

Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu
Elektroniikan ja sähkötekniikan koulutusohjelma

Ilkka Rekola

Melua vaimentavien päällysteiden vaikutukset taajamassa

Diplomityö
Espoo, 28. heinäkuuta 2014

Valvoja: Professori Vesa Välimäki, Aalto-yliopisto
Ohjaaja: FM Ilkka Niskanen, WSP Finland

Aalto-yliopisto
 Sähkötekniikan korkeakoulu
 Elektroniikan ja sähkötekniikan koulutusohjelma

DIPLOMITYÖN
 TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Ilkka Rekola		
Työn nimi:	Melua vaimentavien päällysteiden vaikutukset taajamassa		
Päiväys:	28. heinäkuuta 2014	Sivumäärä:	ix + 79
Pääaine:	Akustiikka	Koodi:	S-108
Valvoja:	Professori Vesa Välimäki		
Ohjaaja:	FM Ilkka Niskanen		
<p>Liikennemelu on suurin yksittäinen melun aiheuttaja kaupunkiympäristössä. Sen syntyy vaikuttavat niin liikenteen määrä, ajonopeus, ajoneuvojen ja renkaiden laatu kuin päällysteen tyyppi ja kunto. Tässä työssä on tutkittu rengasmelun ominaisuuksia sekä mitattu Helsingissä kesällä 2013 päällystettyjen kivimastiksiasfaltteiden meluominaisuuksia suhteessa yleisemmin käytettyyn asfalttibetoniin.</p> <p>Työn teoriaosassa käsitellään rengasmelun syntyä ja leviämistä sekä näiden ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä. Rengasmelusta käydään läpi eri rengasmelun syntymekanismit sekä niiden leviämiseen ja voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Päällysteitä käsitellään niiden meluun vaikuttavien ominaisuuksien kannalta sekä tarkastellaan muutamia yleisimpiä päällystetyyppejä.</p> <p>Työn kokeellisessa osassa käydään läpi mittaustuloksia kesältä 2013, joissa tutkittiin meluominaisuuksia neljässä eri kivimastiksiasfaltilla päällystetyssä kohteessa sekä yhdessä asfalttibetonilla päällystetyssä vertailukohteessa. Osassa kohteista on myös tutkittu suuntaa antavasti nastarenkaiden vaikutusta mitattuihin melutasoihin. Lisäksi tarkastellaan melun leviämistä kohteiden ympäristössä Data-Kustik CadnaA-melulaskentaohjelmalla.</p> <p>Kohteista saatujen tulosten perusteella uusi kivimastiksiasfaltti tuottaa noin 3 - 5 dB hiljaisemman ohiajon aikaisen äänen verrattuna asfalttibetoniin, kun melua mitataan 10 m etäisyydeltä tien keskilinjasta. Laskennallisen tarkastelun perusteella vaikutus tien ympäristön meluallistumiselle on kuitenkin varsin vähäinen, päiväaikaisten keskiäänitasojen laskiessa 1 - 3 dB noin 50 - 100 m etäisyydellä tiestä. Käytettäessä nastarenkaita päällysteiden välillä ei ole merkittävää eroa, rengasmelun tason kasvaessa jyrkästi molemmilla päällysteillä verrattuna nastatomiin renkaisiin.</p>			
Asiasanat:	Akustiikka, akustiset mittaukset, melu, rengasmelu, liikennemelu, hiljaiset päällysteet, kivimastiksiasfaltti		
Kieli:	Suomi		

Aalto University
 School of Electrical Engineering
 Degree Programme in Electrical Engineering

ABSTRACT OF
 MASTER'S THESIS

Author:	Ilkka Rekola		
Title:	Effects of noise cancelling coating in a built-up area		
Date:	July 28, 2014	Pages:	ix + 79
Major:	Acoustics	Code:	S-108
Supervisor:	Professor Vesa Välimäki		
Advisor:	Ilkka Niskanen M.Sc. (Tech.)		
<p>Traffic noise is the single most significant source of noise in the urban environment. Its qualities are affected by the amount and speed of traffic, the types of cars and tires, and type and quality of the pavement. This thesis studies the features of tyre/road noise and goes through the measurements of stone mastic asphalt-pavements that were performed in Helsinki in the summer of 2013.</p> <p>The first part of the thesis deals with the origin and spread of tyre noise, and the different factors that affect them. Different noise mechanisms will be covered as well as all the factors that affect their level and spread. Pavements will be covered by their noise properties and some of the most typical pavement types will be presented.</p> <p>The second part of the thesis presents the noise measurements from summer of 2013, that were done to study the noise characteristics of four stone mastic asphalt pavements and one asphalt concrete pavement as a point of reference. In addition, some suggestive studies are made about the effects of studded tyres in part of the measurements. Based on the obtained results, the spreading of noise is studied with the Datakustik CadnaA noise modelling software.</p> <p>The field measures suggest that stone mastic asphalt leads to 3 - 5 dB in noise reduction, when the noise is measured from a distance of 10 m from the center line of the road. Based on the noise modelling, the effects on the exposure levels are rather low, leading to 1 -3 dB reduction in the daytime average sound level within 50 - 100 m from the center of the road. When using studded tyres, the differences between the two pavement types diminish, as the level of the generated noise increases sharply.</p>			
Keywords:	Acoustics, acoustic measurements, noise, tyre noise, road noise, quiet pavements, stone mastic asphalt		
Language:	Finnish		

Alkusanat

Tämä työ ja sen mittaukset on tehty WSP Finland Oy:n palveluksessa Helsingin kaupungin rakennusviraston ja ympäristökeskuksen toimeksiannosta toukokuun 2013 ja huhtikuun 2014 välisenä aikana. Diplomityön valvojana on toiminut professori Vesa Välimäki Aalto-yliopistosta ja työn ohjaajana filosofian maisteri Ilkka Niskanen WSP Finland Oy:stä. Haluan kiittää heitä molempia työn ammattitaitoisesta ohjaamisesta sekä saamastani rakentavasta palautteesta. Haluan lausua kiitokset myös WSP Finland Oy:lle, Helsingin kaupungin rakennusvirastolle sekä Helsingin kaupungin ympäristökeskukselle työn mahdollistamisesta sekä rahoittamisesta.

Lisäksi haluan kiittää työtoveriani Tuukka Lylyä kaikesta avusta ja tuesta jota sain diplomityötä tehdessäni. Lisäksi kiitoksen ansaitsevat kaikki ne henkilöt, jotka eri tavoin auttoivat minua eteenpäin diplomityöni aikana.

Erityiskiitokset haluan mainita vanhemmilleni Juhanille ja Helenalle saamastani henkisestä ja taloudellisesta tuesta opintojeni aikana.

Espoo, 28. heinäkuuta 2014

Ilkka Rekola

Symbolit

$^{\circ}\text{C}$	Lämpötila celsiusasteina
f	Taajuus
L_p	Äänenpainetaso
L_{Aeq}	A-taajuuspainotettu keskiäänitaso
λ	Aallonpituus
p	Paine
v	Nopeus
w	Teho

Lyhenteet

AB	Asfalttibetoni. Käytetään myös lyhennettä AC (Asphalt concrete)
$dB(A)$	A-taajuuspainotettu desibeliarvo Epävirallinen, mutta yleinen merkintätapa
DGA	Tiheään suhteutettu asfaltti (Dense graded asphalt)
GBR-S	Sileä päällysteäljitelmä
GBR-R	Karkea päällysteäljitelmä
Hz	Hertsi. SI-järjestelmän taajuuden yksikkö
ISO	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
OGA	Avoimeksi suhteutettu asfaltti (Open graded asphalt)
Pa	Pascal. SI-järjestelmän paineen yksikkö
SMA	Kivimastikiasfaltti (Stone mastic asphalt)
SPB	Tilastollinen ohiajomenetelmä (Statistical Pass-by-method)
SPBI	Tilastollinen ohiajaindeksi (Statistical Pass-by Index)
SPL	Äänenpainetaso (Sound pressure level)

Sisältö

Symbolit	v
Lyhenteet	v
1 Johdanto	1
2 Äänen perusteet	3
2.1 Äänenpainetaso	3
2.2 Taajuus	5
2.3 Äänen eteneminen	6
2.4 Melu	8
3 Liikennemelu	10
3.1 Liikennemelun osälähteet	10
3.2 Rengasmelu	11
3.2.1 Mekaaniset rengasmelumekanismit	12
3.2.2 Aerodynaamiset rengasmelumekanismit	13
3.3 Rengasmelun suuntaavuus	17
3.3.1 Horisontaalinen suuntaavuus	17
3.3.2 Vertikaalinen suuntaavuus	18
3.3.3 Torvi-ilmiö	19
3.4 Rengasmelun emissioon vaikuttavat tekijät	19
3.4.1 Renkasiin liittyvät muuttujat	20

3.4.2	Ajoneuvon rakenne	26
3.4.3	Tienpintaan liittyvät muuttujat	27
3.4.4	Nopeus	28
3.4.5	Ympäristötekijät	30
4	Melua vaimentavat päällysteet	33
4.1	Hiljaisen päällysteen määritelmä	33
4.2	Päällysteen hiljaisuuden osatekijät	34
4.2.1	Pinnan tekstuuri	34
4.2.2	Huokoisuus	36
4.2.3	Jäykkyys ja elastisuus	36
4.2.4	Väri	37
4.3	Muutamia melua vaimentavia päällystetyyppejä	38
4.3.1	Asfalttibetoni	38
4.3.2	Huokoinen asfaltti	39
4.3.3	Kivimastiksiasfaltti	39
4.3.4	Kumi-asfaltti	40
4.4	Päällysteiden kuluminen	40
5	Mittausjärjestelyt	42
5.1	Tilastollinen ohiajomittausmenetelmä (SPB)	42
5.1.1	Laskentamalli	45
5.2	Tulosten normalisointi	45
5.2.1	Taustamelun korjaus	46
5.2.2	Lämpötilakorjaus	46
5.2.3	Nopeuskorjaus	47
5.3	Mittauslaitteisto	47
5.4	Mittauskohteet	48
5.4.1	Näyttelijäntie	49
5.4.2	Malminkartanontie	50
5.4.3	Pirkkolantie	50

5.4.4	Päivöläntie	51
5.4.5	Intiankatu	51
6	Tulokset	52
6.1	Mittaustulokset	53
6.1.1	Mittausten aikaiset olosuhteet	53
6.1.2	Mittausten aikainen liikenne	54
6.1.3	Rengasmelumittaukset	55
6.1.4	Tulosten normalisointi	56
6.1.5	Nastarenkaiden vaikutus keskiäänitasoihin	57
6.2	Kohteiden laskennallinen tarkastelu	58
6.3	Virhetarkastelu	61
7	Yhteenveto ja johtopäätökset	62
A	Kohdekohtaiset tulokset.	67
B	Meluvyöhykekartat	77

Luku 1

Johdanto

Melu aiheuttaa ihmisissä jo lyhyessäkin ajassa erinäisiä stressireaktioita, kuten väsymystä, unenpuutetta, päänsärkyä ja keskittymisvaikeuksia. Melulle altistumisen pitkittyessä nämä oireet voivat johtaa vakaviin fyysisiin ja psyykkisiin ongelmiin. Meluhaittojen ehkäiseminen on siis yksi tärkeimmistä kaupunkisuunnittelun prioriteeteista. Suomessa noin kuudesosa ja Euroopassa noin kolmasosa väestöstä altistuu ympäristömelulle päivittäin [1] johtaen valtaviin kustannuksiin yhteiskunnalle niin tuottavuuden alenemisena kuin terveydellisinä kuluina [2].

Merkittävin yksittäinen melun aiheuttaja on liikenne ja suurin osa taajama-alueiden asukkaista altistuukin sen tuottamalle melulle päivittäin. Liikennemelun olemassaolo asettaakin paineen sen torjumiselle, vähentämiselle ja ehkäisemiselle. Tyypillisimpiä meluntorjuntakeinoja ovat meluesteet, rakennusten julkisivujen ääneneristävyyden parantaminen, melua vaimentavat päällysteet, nopeusrajoitusten pienentäminen ja liikenteen kokonaismäärän vähentäminen. Tiheään rakennetuilla alueilla tieliikennemelun torjuminen meluesteillä on käytännössä mahdotonta tilan puutteesta johtuen ja julkisivujen ääneneristävyyden parantaminen ei vähennä ulkona leviävää melua. Liikenteen määrän vähentäminen ja ajonopeuksien pienentäminen ovatkin lopputuloksen kannalta tehokkain ratkaisu liikennemelun vähentämiseen, mutta sen toteuttamista rajoittavat muut kaupunkisuunnittelua ohjaavat elementit. Melua vaimentavat päällysteet ovatkin liikenteen vähentämisen jälkeen yksinkertaisin tapa vähentää liikennemelua kaupunkiympäristössä.

Hiljaisia päällysteitä ja niiden vaikutuksia liikenteen aiheuttamiin melutasoihin on tutkittu runsaasti kuluneiden kahden vuosikymmenen aikana. Eri hiljaisten päällystetyyppien haasteina ovat olleet päällysteen nopea kuluminen ja melua vaimentavien ominaisuuksien katoaminen ajan myötä. Hiljaisia

päälysteitä ei näin ollen ole Suomessa vielä ole otettu käyttöön suuressa mitataavassa ja niiden käyttö on toistaiseksi rajoittunut paikallisiin kokeiluihin.

Tämä työ liittyy Helsingin kaupungin meluntorjunnan toimintasuunnitelmiin vuosilta 2008 ja 2013 [3]. Toimintasuunnitelmien tavoitteena on parantaa Helsingin melutilannetta ja vähentää asukkaille aiheutuvia haittoja. Yhtenä suunnitelman toimenpiteenä on melua vaimentavien päälysteiden ottaminen laajamittaiseen käyttöön. Tämän toimenpiteen toteuttamiseksi Helsingin kaupungin rakennusvirasto (HKR) käytti kesällä 2013 melua vaimentavaa päälystettyä useisiin päälystyskohteisiin eri puolilla Helsinkiä. Tähän työhön on näistä päälystyskohteista tarkasteltavaksi valittu viisi eri kohdetta, neljä melua vaimentavalla ja yksi tavallisella päälysteellä päälystettyä kohdetta. Työn tarkoituksena on tarkastella päälysteistä saavutettavia etuja saman kohteen aikaisempaan päälysteeseen verrattuna sekä selvittää melua vaimentavista päälysteistä saatavaa hyötyä erilaisissa kaupunkiympäristöissä.

Työ on kaksiosainen. Kirjallisuuskatsauksessa (luvut 2, 3 ja 4) lukija perehdytetään liikennemelun synnyn ja hiljaisten päälysteiden kannalta oleellisiin taustatietoihin ja ilmiöihin.

Luvussa 2 tarkastellaan akustisia perusilmiöitä ja käsitteitä. Luvussa käsitellään äänen syntyä ja etenemistä väliaineessa sekä ihmisen kuulon toimintaa ja melun vaikutusta siihen.

Luvussa 3 tarkastellaan liikennemelun eri käsitteitä ja syntymekanismeja. Luvussa käydään läpi liikennemelun syntyyn ja leviämiseen vaikuttavia osatekijöitä yksittäisen ajoneuvon tarkkuudella.

Luvussa 4 perehdytään päälysteiden meluominaisuuksiin sekä melua vaimentaviin päälysteisiin ja niiden erityispiirteisiin verrattuna perinteisiin päälystetyyppeihin.

Luvut 5 ja 6 muodostavat työn kokeellisen osan, jossa esitetään tutkimusmenetelmät ja saavutetut tulokset. Luvussa 5 käydään läpi Helsingissä kesällä 2013 tehdyt liikennemelumittaukset. Luvussa esitellään työn lähtökohdat ja tutkimusmenetelmät sekä esitellään mittauskohteet. Mittauksista saadut tulokset on vuorostaan esitetty luvussa 6.

Luku 2

Äänen perusteet

Ääni on väliaineessa aaltoliikkeenä etenevää hiukkasten värähtelyä. Ilmassa edetessään ääniaalto aiheuttaa pieniä muutoksia ilmanpaineeseen, jotka korvaan edetessään saavat aikaan kuuloaistimuksen. Kuuloaistimuksessa voimme havaita näistä paineen vaihteluista niiden vahvuuden eli amplitudin ja nopeuden vaihtelut eli taajuuden. [4]

2.1 Äänenpainetaso

Ääniaaltojen aiheuttamat paineen muutokset ovat varsin pieniä verrattuna normaaliin ilmanpaineeseen (101,3 kPa). Pienin ihmisen havaittavissa oleva äänenpaineen muutos on noin 20 μPa , joka on alle miljardisosa vallitsevasta ilmanpaineesta, kun taas ihmisen kuulon kipukynnys saavutetaan 63 Pa:n painessa, joka on sekin vain alle sadasosa normaalista ilmanpaineesta.

Ihmisen kuulo toimii logaritmisesti, eli se aistii äänenpaineen suhteelliset muutokset samansuuruusina. Logaritmisella asteikolla yksi askelväli tarkoittaa luvun kasvamista tietyn vakiokertoimen mukaisesti, joka on hyödyllistä kun ollaan kiinnostuneita enemmänkin suhteellisesta kuin absoluuttisesta muutoksesta. Akustiikassa käytetään 10-kantaiseen logaritmiin perustuvaa mittaa, jonka yksikkönä on desibeli [dB].

Äänenpaineen muutokset saadaan muutettua logaritmiselle asteikolle seuraavasti:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (2.1)$$

missä L_p on äänenpainetaso [dB]
 p on äänenpaine [Pa]
 p_0 on referenssiäänenpaine ($20 \mu\text{Pa}$)

Ihminen kykenee aistimaan kuulollaan keskimäärin noin 2-3 dB suuruisia tasomuutoksia. Tämä vastaa suurinpiirtein tilannetta, jossa äänilahteiden määrä tuplaantuu. Kuulija kokee kuitenkin äänenpainetason kaksinkertaistuvan vasta 10 dB korotuksen jälkeen.

Taulukko 2.1: Esimerkkejä äänenpainetasoista ja niitä synnyttävistä lähteistä [4].

Äänenpainetaso (dB)	Lähde
120	Suihukoneen nousu (et. 60 m)
110	Työmaa
100	Huuto (et. 1,5 m)
90	Kuorma-auto (et. 15 m)
80	Vilkas katu
70	Auton sisätilat
60	Normaali keskustelu
50	Toimisto, luokkahuone
40	Olohone
30	Makuuhuone yöllä
20	Studio
10	Lehtien havina
0	Kuulokynnys

Tietyn äänilähteen synnyttämään äänenpainetasoon vaikuttavat kolme tekijää [5]:

- lähteen akustinen teho
- etäisyys lähteeseen
- ympäristö (heijastukset, sää)

Näistä vain lähteen teho on äänilähteen oma ominaisuus. Se ilmaisee kuinka suuren akustisen tehon tietty äänilähde tuottaa. Tehoa ilmaistaan äänitehotasona ja se määritellään yhtälöllä

$$L_w = 10 \lg \frac{w}{w_0} \quad (2.2)$$

missä L_w on äänitehotaso [dB]
 w on mitattu ääniteho [W]
 w_0 on vertailuteho 10^{-12} W [4]

2.2 Taajuus

Äänen taajuus kertoo sen nopeuden, jolla äänenpaineen muutokset tapahtuvat. Taajuus ilmaisee kuinka monta kertaa aalto oskilloi sekunnissa, ja aallonpituus on värähtelyn kahden samassa vaiheessa olevan pisteen välinen etäisyys. Taajuuden yksikkö on hertsi [Hz] ja 1 Hz vastaa yhtä värähdystä sekunnissa.

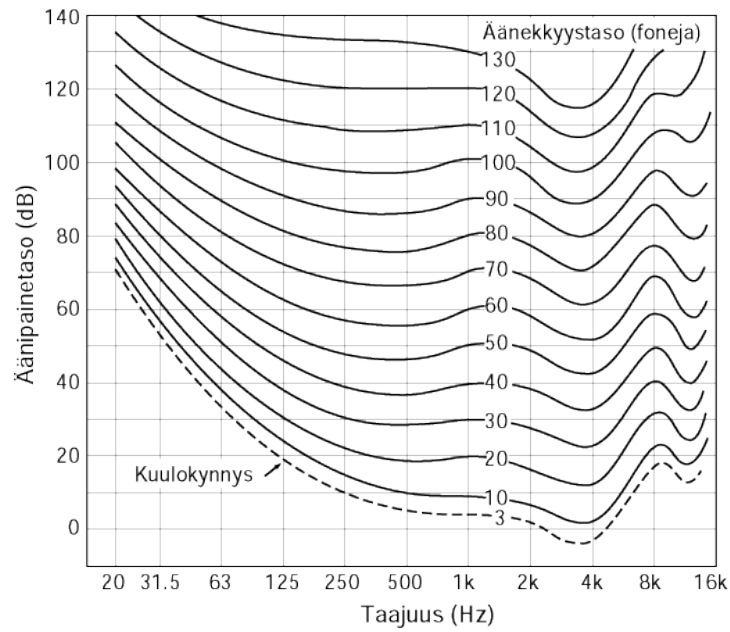
$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

missä f on taajuus [Hz]
 c on äänen nopeus ilmassa (345 m/s)
 λ on aallonpituus [m]

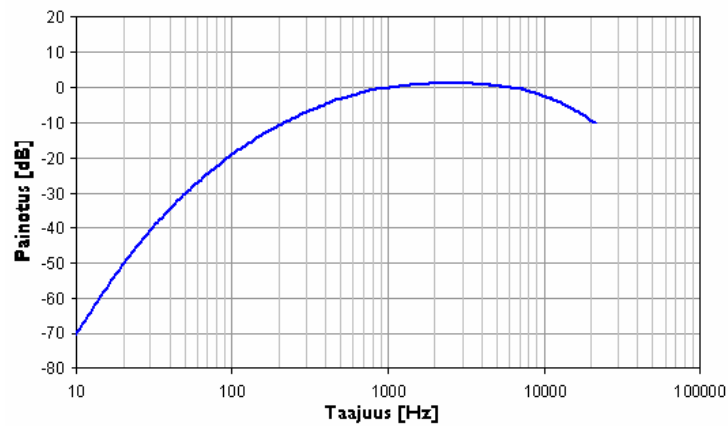
Luonnossa esiintyvät äänet koostuvat harvoin vain yhdestä taajuudesta, äänen jakautuessa useammalle eri taajuudelle. Äänen esitysmuotoa, jossa on esitetty kaikki tarkasteltavassa äänessä esiintyvät taajuudet ja niiden suhteelliset voimakkuudet, kutsutaan äänen spektriiksi.

Ihmisen kuulo ei ole yhtä herkkä kaikille taajuuksille. Normaali terve nuori ihminen kuulee ääniä taajuuksien 20 Hz ja 20 kHz välillä, kuulon ollessa herkimmillään taajuusalueella 2000 - 5000 Hz. Kuulon herkkyyden vaihtelua eri taajuuksien välillä kuvaa vakioäänekkyyssäyrästä (kuva 2.1), jossa kuvataan ihmisen kuulon herkkyyttä taajuuden muuttujana. Äänekkyydystason yksikkö on foni ja se kertoo yhtä äänekkään 1 kHz äänekseen äänepainetasoa desibeleinä [6]. Esimerkiksi 110 dB:n äänepainetaso taajuudella 20 Hz tuottaa äänekkyydystason 80 fonia, koska se kuulostaa ihmiselle yhtä kovalta kuin 80 dB taajuudella 1 kHz.

Jotta eri yhteyksissä esitetyt kokonaisäänepainetasot vastaisivat mahdollisimman hyvin ihmisen kuuloa, tuloksien esittämistä varten on kehitetty erilaisia painotuskäyriä. Näistä yleisin, A-painotus, kuvaa likimain ihmisen korvan kuulemaa taajuusvastetta (esitetty kuvassa 2.2). A-painotettu äänepainetaso ilmoitetaan usein yksiköllä dB(A), mutta tämä ei kuitenkaan ole virallinen käytäntö.



Kuva 2.1: Vakioäänekkyyskäyrästä. Kuvaaja havainnollistaa havaittua äänenpainetasoa suhteessa todelliseen äänenpainetasoon. [6]



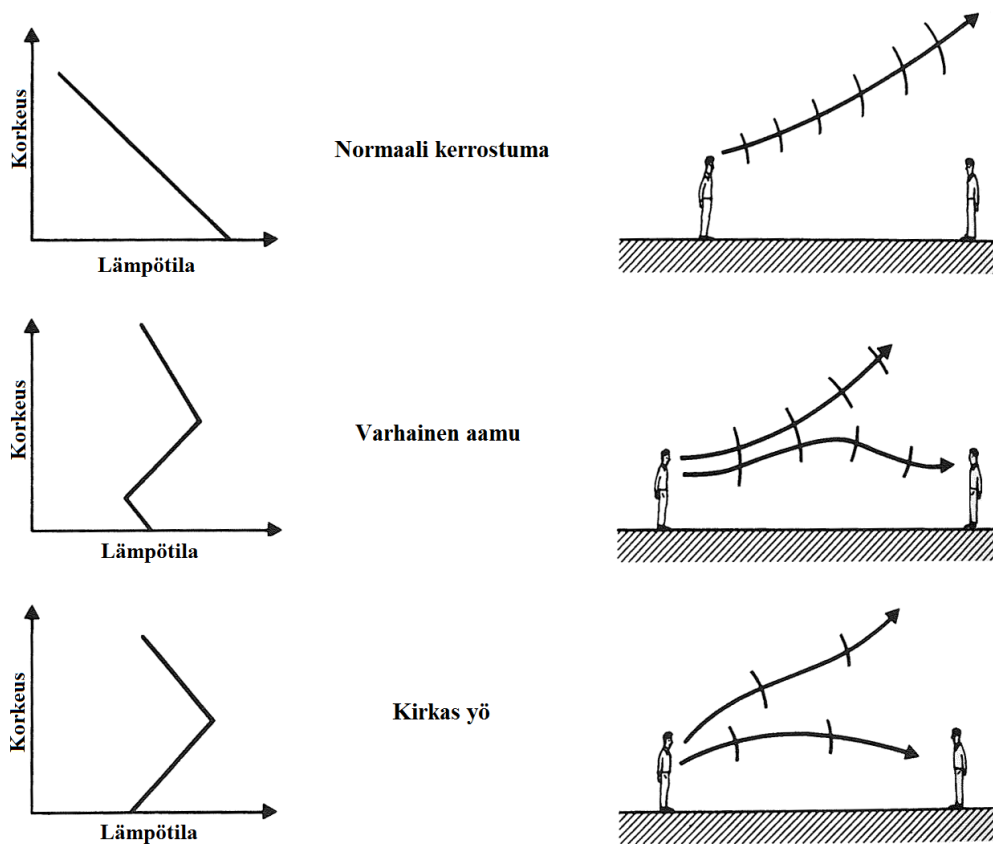
Kuva 2.2: A-painotuskäyrä [IEC 651 (1979)]

2.3 Äänen eteneminen

Ilmamassojen liikkeit, lämpötila, tuuli sekä ilmankosteus ja -paine vaikuttavat olennaisesti äänen etenemiseen ilmassa. Ääniaallot käyttäytyvät eri ta-

voin eri olosuhteissa, joten muutokset edellä mainituissa ominaisuuksissa aiheuttavat ääniaaltojen taittumista sekä heijastumista ilmamassojen rajapinnoissa.

Tyypillisesti ilma on lämpimämpää lähellä maan pintaa, taittaen ääniaaltoja poispäin maan pinnasta. Oikeissa olosuhteissa ääni voi kuitenkin heijastua ylemmistä ilmakerroksista alaspäin, jolloin ääni voi olla kuultavissa pitkienkin matkojen päässä. Ilman lämpötilojen kerrostumisesta aiheutuvaa taittumista tyypillisessä ilmatilassa on havainnollistettu kuvassa 2.3.



Kuva 2.3: Normaalisti ilman lämpötila laskee korkeuden kasvaessa, joten ääniaallot kaartavat poispäin maasta ensimmäisen esimerkin mukaisesti. Kahdessa jälkimmäisessä esimerkissä on havainnollistettu tilannetta, jossa ääni taittuu osittain maata kohti. [7]

2.4 Melu

Melulla tarkoitetaan ääntä, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä tai joka on hänen hyvinvoinnilleen vaarallista. Käsitteenä melu on subjektiivinen. Ihmiset reagoivat ääniin eri tavoin ja yksi voi kokea tietyn äänen erittäin häiritsevänä toisen nauttiessa samasta äänestä. Äänen lähde, sisältö, voimakkuus, kesto, jatkuvuus, satunnaisuus ja hallittavuus vaikuttavat siihen, kuinka häiritsevänä ääni koetaan. Samoin myös kuulijan piirteet kuten meluherkkyys, ikä, sukupuoli ja terveydentila vaikuttavat siihen mitkä äänet kukin kokee meluksi. Meluherkkyys on yksilöllinen ominaisuus joka mittaa yksilön kokemaa melun häiritsevyyttä. Suomen väestöstä arvioidaan meluherkkiä olevan noin 30 - 40 %. [8]

Selkein seuraus melusta ovat väliaikaiset tai pysyvät kuulovauriot. Kuulovaurion riski voi syntyä pitkäaikaisessa altistumisessa yli 80 - 85 dB melutasoille, suuremmilla melutasoilla jo lyhyellä aikavälillä. Ympäristömelua ei tavallisesti kuitenkaan esiinny niin korkeina äänenpainetasoina, että selkeitä fyysisiä vammoja ilmenisi. [5]

Yleisimmät seuraukset ympäristömelulle altistumisesta ovat unihäiriöt, keskittymiskyvyn häiriintyminen sekä stressi ja siihen liittyvät oireet kuten sydän- ja verisuonisairaudet ja mielenterveydelliset oireet. Unihäiriöt ovat näistä suurin haitta, sillä ne johtavat väistämättä edellä mainittuihin oireisiin. Unihäiriöt syntyvät unen lyhentyessä nukahtamisen vaikeutuessa tai lisääntyneinä heräämisinä melusta johtuen. Melu voi myös heikentää unen laatua. Herkimät seuraukset uneen voidaan nähdä, kun melu ylittää äkillisesti 40 dB tai pitempään jatkuessaan 45 dB. Rajat eivät kuitenkaan ole täysin selkeitä, sillä yksilöllistä tottumista meluun tapahtuu. [9]

Melua mitataan yleensä A-painoitettuna keskiäänitasona eli ekvivalenttitasona (L_{Aeq}), joka ottaa huomioon lisäksi melualtistuksen keston. L_{Aeq} ei ole aikajakson sisällä tapahtuneen äänen keskiarvo, vaan äänitaso joka tuottaa vastaavan aikajakson aikana yhtä suuren energiamäärän kuin mitattu ääni. Melun ekvivalenttitaso määritetään kaavalla [10]:

$$L_{Aeq} = 10 \lg \left[\frac{1}{T} \int_T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt} \quad (2.4)$$

- missä L_{Aeq} on A-painotettu ekvivalentti äänenpainetaso [dB]
 T on melutapahtuman kesto
 $p(t)$ on mitattu A-painotettu äänenpaine ajan funktiona [Pa]
 p_0 on referenssiäänenpaine ($20\mu\text{Pa}$)

Koska melu aiheuttaa niinkin laajaa ympäristön pilaantumista, sen torjumiseksi on asetettu erinäisiä säännöksiä. Näistä tärkein on Valtioneuvoston päätös (993/1992), joka asettaa keskiäänitasojen ohjearvot sisä- ja ulkomelulle päivä- ja yöaikaan (taulukko 2.4). Näitä ohjearvoja sovelletaan niin maankäytön, rakentamisen sekä liikenteen suunnittelussa ja lupamenettelyssä kuin ympäristölupaharkinnassa.

Taulukko 2.2: Keskiäänitasojen ohjearvot sisä- ja ulkomelulle päivä- ja yöaikaan [Valtioneuvoston päätös (993/1992)].

Ulkona	$L_{Aeq(7.00-22.00)}$	$L_{Aeq(22.00-7.00)}$
Asumiseen käytettävät alueet, virkistysalueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- ja oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB	45-50 dB*
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnonsuojelualueet	45 dB	40 dB**
Sisällä		
Asuin, potilas- ja majoitushuoneet	35 dB	30 dB
Opetus- ja kokoontumistilat	35 dB	-
Liike- ja toimistohuoneet	45 dB	-

*Uusilla alueilla yöohjearvo on 45 dB. Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoa.

**Yöohjearvoa ei sovelleta sellaisilla luonnonsuojelualueilla, joita ei yleensä käytetä oleskeluun tai luonnon havainnointiin yöllä.

Luku 3

Liikennemelu

3.1 Liikennemelun osalähteet

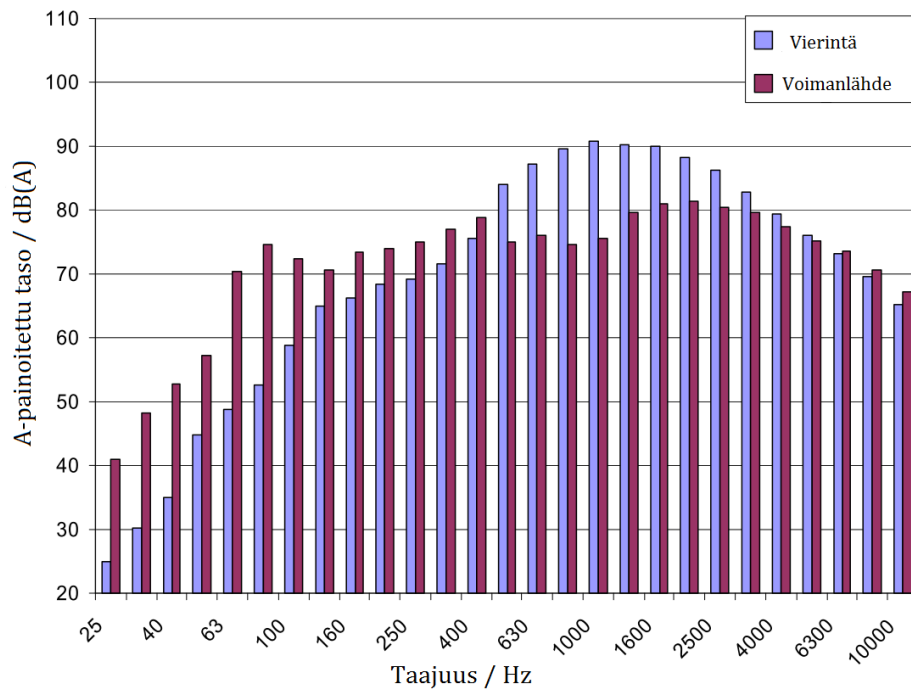
Yksittäisen ajoneuvon melua synnyttävät osalähteet ovat rengasmelu, aerodynaaminen melu sekä voimalähteen melu, joka pitää sisällään myös moottorin tuulettimen, pakoputken ja voimansiirron aiheuttaman melun. Eri osalähteiden keskinäiseen suhteeseen vaikuttavat ajoneuvon tyyppi, tien rakenne, liikenteen virtaavuus sekä ajotapa.[11]

Pienillä nopeuksilla ajoneuvon voimalähteen melu dominoi suhteessa muihin melulähteisiin, ja on olemassa selkeä rajanopeus jonka jälkeen rengasmelu nousee dominoivaksi melulähteeksi. Taulukossa 3.1 on esitetty arvioita nopeuksista muutamien ajoneuvotyyppien kohdalla, joissa rengasmelun osuus kokonaismelusta ylittää moottorimelun [7]. Aerodynaaminen melu kasvaa muihin lähteisiin verrattuna selkeästi vasta erittäin suurilla nopeuksilla (> 150 km/h), jotka ovat käytännössä harvinaisia tieliikenteessä [7]. Tätä pienemmillä nopeuksilla aerodynaamista melua on käytännössä mahdotonta erottaa rengasmelusta.

Rengasmelu ja moottorimelu ilmenevät myös eri taajuusalueilla. Rengasmelu nousee selkeästi muita äänilähteitä voimakkaammaksi tuhannen hertsin ympäristössä. Voimanlähteen melu taas korostuu 500 Hz ja sitä pienemmillä taajuuksilla, korostuen erityisesti 60 Hz kohdalla. Eroa on havainnollistettu kuvassa 3.1, jossa on esitetty rinnakkain voimanlähteestä ja renkaiden vierinnästä syntyvän melun A-painotetut spektrit. [12]

Taulukko 3.1: Nopeusalueita eri tilanteissa, joissa nopeuden kasvaessa rengasmelu ylittää moottorimelun[7].

Ajoneuvon tyyppi	Vakionopeudella	Kiihdyttäen
Autot vm. 1985-95	30-35 km/h	45-50 km/h
Autot vm. 1996-	15-30 km/h	30-45 km/h
Raskaat vm.1985-95	40-50 km/h	50-55 km/h
Raskaat vm. 1996-	30-35 km/h	45-50 km/h
Raskaat 2-akseliset	75 km/h	-
Raskaat 4-akseliset	100 km/h	-



Kuva 3.1: Ajoneuvon voimanlähteen aiheuttaman melun ja rengasmelun vertaaminen. Kyseessä 50 km/h ajava henkilöauto. [12]

3.2 Rengasmelu

Rengasmelun syntyyn vaikuttaa suuri joukko eri tekijöitä, kuten:

- ajoneuvon tyyppi
- akselipaino
- rengaspaine
- rengastyypit (kesä-, kitka-, nastarengas)
- renkaan koko
- renkaan lämpötila
- renkaan pinnan kuviointi ja koostumus
- tien pinnan laatu ja lämpötila

Rengasmelun synty on monimutkainen kokonaisuus, jota ei vielä täysin yksiselitteisesti tunneta. Kokonaisuuteen vaikuttavia osatekijöitä sekä niiden vuorovaikutuksia on kymmeniä ja lopulliseen melupäästön tasoon sekä suuntaavuteen vaikuttavat niin päällyste, rengas kuin ajoneuvon nopeus [7]. Melua synnyttävät mekanismit voidaan kuitenkin jakaa kahteen osajoukkoon niiden syntymekanismien mukaan: mekaanisiin ja aerodynaamisiin mekanismeihin.

3.2.1 Mekaaniset rengasmelumekanismit

Kuviopalan/tekstuurin isku

Renkaan pyöriessä renkaan pintakuviointin kuviopalat liikkuvat kohti tien pintaa. Kuviopalan saapuessa renkaan ja tien kontaktipinnalle kuviopala iskeytyy päällysteeseen tuottaen melua sekä radiaalisia ja tangentialisia värähtelyjä renkaan rakenteisiin. Vastaava ilmiö tapahtuu käänteisenä renkaan ja tien kosketuspinnan jättöpuolella, kuviopalan vapautuessa puristuksista. Sama mekanismi on kyseessä myös silloin, kun tilannetta katsotaan päällysteen suunnasta: Tien pinnan tekstuuri iskeytyy renkaan pintaan, aiheuttaen värähtelyjä renkaan rakenteisiin.

Tangentiaalinen takertumis-luiskahdus (stick-slip)

Renkaan kuviopalan painautuessa tien pintaa vasten ja renkaan rakenteen litistyessä, syntyy renkaan ja tien välille tangentiaalisia voimia. Näitä muutoksia vastustavien kitkavoimien (eli renkaan jäykkyyden ja muiden jäännösvoimien) vapautuessa kosketuspinnan jättöpuolella, renkaan kulutuspinna luiskahtaa tien pintaa pitkin tuottaen melua.

Rungon värähtely

Tien ja renkaan kontaktipinnassa syntyneet värähtelyt kulkeutuvat renkaan rakenteissa renkaan kylkiin sekä muualle kulutuspinalla. Rakenteet toimivat tämän jälkeen värähtelevän kalvon tavoin, levittäen ääntä ympäristöön. Renkaan kuoren resonanssitaajuuudet asettuvat välille 200 - 400 Hz.

Takertumis-napsahdus (stick-snap)

Tien pinnan ollessa tarpeeksi puhdas ja lämpötilan tarpeeksi korkea, voi renkaan pinta kosketuksen yhteydessä tarttua tien pintaan kiinni. Palan irroittamiseen tarvitaan voimaa ja palan irrotessa tiestä renkaaseen syntyy radiaalista värähtelyä. Takertumis-napsahdus -mekanismin osuus koko rengasmelusta on kuitenkin varsin vähäinen, eikä sillä tunnu olevan merkitystä muuta kuin laboratorio-olosuhteissa. [7]

3.2.2 Aerodynaamiset rengasmelumekanismit

Turbulenssi

Turbulenssia syntyy renkaan halkoessa sen edessä olevaa ilmaa, aiheuttaen näin turbulenttisia pyörteitä. Ilmiötä vahvistaa renkaan kuviointi kuviopalojen kauhoessa ilmaa renkaan edestä. Kokonaismelun kannalta renkaan turbulenssilla ei kuitenkaan vaikuta olevan ratkaisevaa merkitystä muuta kuin korkeilla nopeuksilla huokoisella päällysteellä. [7]

Ilman pumppaus

Renkaan painautuessa tien pintaa vasten painautuu renkaan rakenne kasaan, työntäen samalla renkaan kuvioinnin rakenteissa olevaa ilmaa ulos. Vastaavasti renkaan jättöpuolella melua syntyy ilman virratessa takaisin renkaan onkaloihin syntyneeseen alipaineeseen, renkaan rakenteen taas avautuessa.

Ilman pumppaus tuottaa huomattavasti melua 1 - 3 kHz taajuusalueella, ollen yksi tärkeimmistä rengasmelun syntymekanismeista. Sen suuruuteen voidaan vaikuttaa suuresti renkaan kuvioinnin koolla sekä tien pinnan rakenteella. Huokoinen tie päästää ilman liikkumaan helpommin, vähentäen renkaan alla syntyviä painevaihteluja.[7]

Ilman pumppaamiselle on esitetty kaavaa 3.1, joka perustuu akustisen monopolin tuottamaan paineeseen p . [13]

$$p = \frac{\rho \ddot{V}}{4\pi r} \quad (3.1)$$

missä ρ on ilman tiheys,
 \ddot{V} on kuvioinnista ulos työntyvän ilman tilavuuden toinen aikaderivaatta,
 ja r on etäisyys kontaktipinnasta.

Edellistä kaavaa on pidetty riittämättömänä ilman pumppaamisen aiheuttaman melun mallintamiseen, koska akustinen monopoli ei kuvaa tarpeeksi tarkasti ilman puristumista renkaan alta. Sen rinnalle on esitetty muun muassa kaavaa 3.2, joka kuvaa pumpatun ilman kineettistä energiaa renkaan ominaisuuksien muuttumisen suhteen. [14]

$$E = \frac{\rho W A^3 L^3 v^2}{2 \left(1 - \frac{A}{d_0}\right) d_0^4} \quad (3.2)$$

missä W on uran syvyys,
 L on uran leveys,
 ρ on ilman tiheys,
 v on ajoenuvon nopeus,
 d_0 on uran pituus renkaan kaarella,
 ja A on uran pituus renkaan ollessa täysin puristettuna.

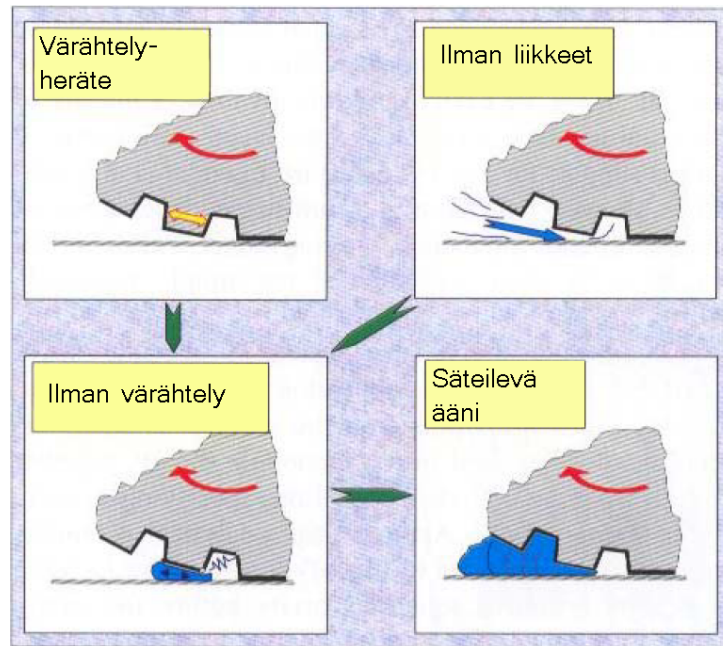
Helmholtz-resonanssi

Helmholtz-resonanssia syntyy renkaiden pyöriessä renkaan kuvioinnin väliin jääneen ilman alkaessa jälleen liikkua vapaasti. Kuviopalan ja tien pinnan välinen ilmamassa toimii värähtelijänä ja kuviopalojen väliseen onkaloon jäänyt ilma jousena, renkaan värähtelyn ja ilman liikkeen toimiessa herätteenä. Ilmiötä havainnollistettu kuvassa 3.2.

Koska ilmiöön vaikuttavien osasten suhteet muuttuvat varsin nopeasti renkaan pyöriessä, perinteinen Helmholtz-resonaattorin kaava ei kuvaa selkeästi renkaissa syntyvää resonanssia. Ilmiötä kuvaa paremmin lähteessä [15] esitetty kaava, jossa värähtelijän resonanssitaajuus esitetään ontelon ja tien pinnan suhteen muuttujana:

$$\frac{V_0}{s_1 x_1} = \frac{1 + (kx_1)^2}{\beta (kx_1)^2 \left(1 + \left(\frac{\gamma kx_1}{2\beta}\right)^2\right)} - \frac{1 - \frac{kx_1}{\tan(kx_1)}}{(kx_1)^2} \quad (3.3)$$

missä V_0 on uran tilavuus,
 x_1 on jättöreunan kulman ja uran kulman välinen etäisyys,
 k on aaltoluku eli $2\pi f/c$ (missä f on taajuus ja c äänen nopeus),
 s_1 on pinta-ala uran reunan ja tienpinnan välillä,
 β on korjauskerroin massaimpedanssille,
 ja γ on korjauskerroin resistiiviselle impedanssille.



Kuva 3.2: Renkaan kuvioinnissa syntyvä Helmholtz-resonanssi. Renkaan kuviopalojen värähtelyt sekä pyörimisestä johtuva ilman virtaus saavat kuvioinnissa olevan ilman värähtelemään joka vuorostaan synnyttää ääntä. [7]

Pilliresonanssi

Renkaan painautuessa sileää tien pintaa vasten syntyy renkaan kuvioinnin ja tien pinnan väliin putki, johon syntyy seisovia aaltoja. Resonanssäänen perustaajuus saadaan esille kaavasta 3.4 [7]:

$$f_n = \frac{n c}{2(L + 0,8 d)} \quad (3.4)$$

missä f_n on onkalon resonanssitaajuus [Hz],
 L on pillin pituus [m],
 d on pillin halkaisija [m],
 c on äänen nopeus [m/s],
 ja n on kokonaisluku.

Muuttujan n arvolla 1 saadaan perustaajuus ja sitä suuremmilla arvoilla harmoniset taajuudet. Tätä kutsutaan puolialtoresonaattoriksi. Jos putki on toisesta päästä suljettu, on kyseessä neljännesaaltoresonaattori. Tällöin kaavaa 3.4 muutetaan korvaamalla muuttuja n arvolla $n - 1/2$.

Onteloresonanssi

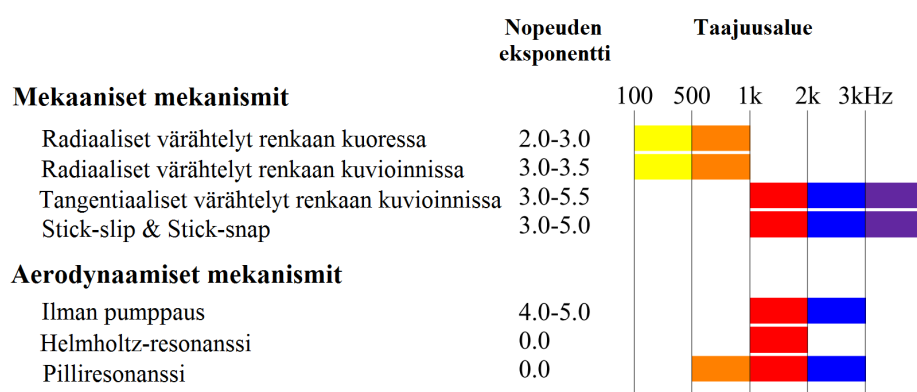
Kuten rungon värähtelyssä, onteloresonanssissa tien ja renkaan kosketuspinnassa syntyvä värähtely johtuu renkaan rungon ohella myös renkaan sisällä olevaan ilmaan. Renkaan sisuksen toroidaalisen onkalon ominaisvärähtelytaajuudella ilma renkaassa alkaa resonoida, tuottaen melua. Renkaan resonanssitaajuus sekä kolme ensimmäistä moodia voidaan laskea kaavalla 3.5, resonanssitaajuuden ollessa tyypillisimmillä rengas-vanne yhdistelmillä 220 - 280 Hz. [16]

$$f_m = m \frac{c}{2\pi R'} \quad (3.5)$$

missä f_m on resonanssitaajuus [Hz],
 m on kokonaisluku (1-4),
 c on äänen nopeus renkaan sisällä [m/s]
 ja R' on ontelon keskikohdan säde [m].

Rengasmelun eri osatekijät painottuvat kukin hieman eri taajuusalueille. Yleiskatsaus melulähteiden jakautumisesta on esitetty kuvassa 3.3. Kuvassa mainittu nopeuden eksponentti kertoo kunkin melua synnyttävän mekanismin herkkyydestä nopeuteen ja sitä käsitellään myöhemmin osiossa 3.4.4.

Kuvan pohjalta voidaan helposti todeta matalien taajuuksien (<1 kHz) melun syntyvän pääosin renkaan rungon ja kuvioinnin radiaalisesta värähtelystä. Korkeampiin taajuuksiin vaikuttaa sen sijaan useampi eri ääntä tuottava mekanismi, tehden rengasmelun tarkasta matemaattisesta mallintamisesta haastavan ongelman.



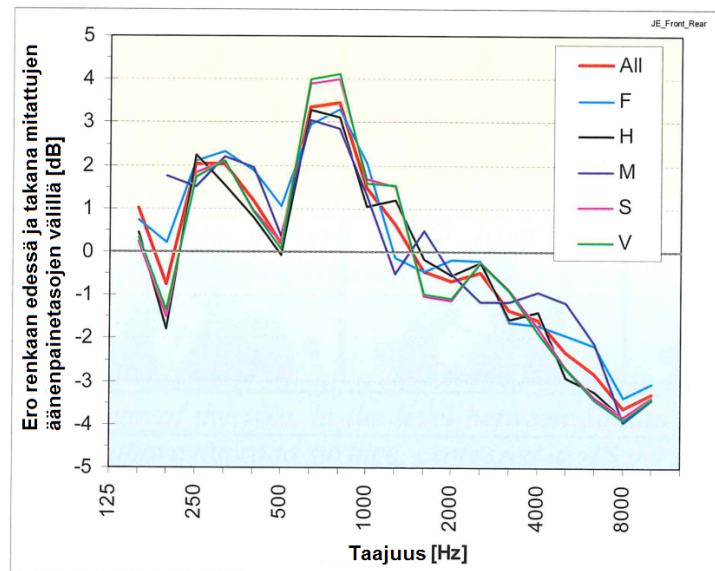
Kuva 3.3: Rengasmelun osatekijöiden jakautuminen eri taajuusalueille [17]

3.3 Rengasmelun suuntaavuus

Ottaen huomioon rengasmelun syntymekanismien monimuotoisuuden, on selkeää, että rengasmelua ei voida käsitellä yksinkertaisesti ympärisäteilevänä pistemäisenä äänilähteenä eli akustisena monopolina. Voidaan todeta, että rengasmelulla on suuntaavuutta, johon vaikuttavat niin rengas, tien pinnan ominaisuudet kuin auton kori. Suuntaavuudella on suuri vaikutus tien reunalla havaittuihin melutasoihin.

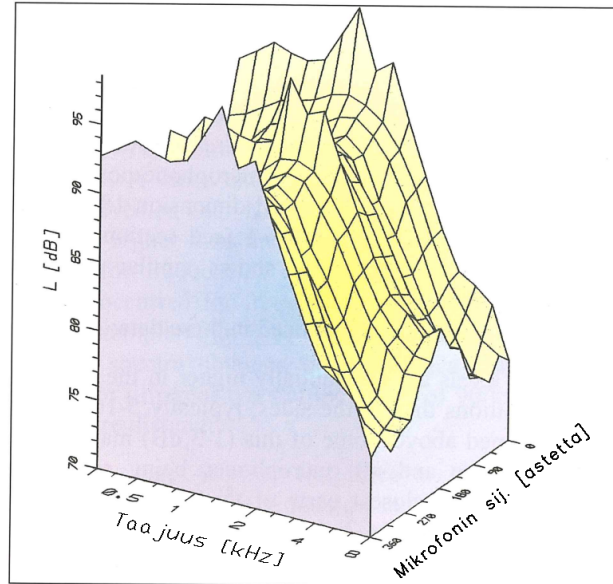
3.3.1 Horisontaalinen suuntaavuus

Rengasmelun horisontaalinen suuntaavuus voidaan jakaa seuraaviin pääominaisuuksiin: emissio on suurimmillaan renkaan edessä, toiseksi suurin renkaan takapuolella ja alhaisin sivuilla. Renkaan etupuolelle leviävä melu on noin 0,5 - 1,4 dB(A) korkeampi kuin renkaan takapuolella ja erityisesti välillä 400-1000 Hz, jossa ero voi olla 1-3 dB. Yli tuhannen hertsin taajuuksilla renkaan takapuolen emissiot dominoivat, ollen noin 1-4 dB korkeampia. Renkaan etu- ja takapuolen äänenpainetasojen eroja on havainnollistettu kuvassa 3.4.



Kuva 3.4: Rengasmelun spektrien ero renkaan etu- ja takapuolen välillä GRB-S tiejärjitelällä nopeudella 90 km/h. S, H, ja V ovat eri nopeusluokkien kesärenkaita, F on kitkarengas ja M on maasto/lumirengas.[7]

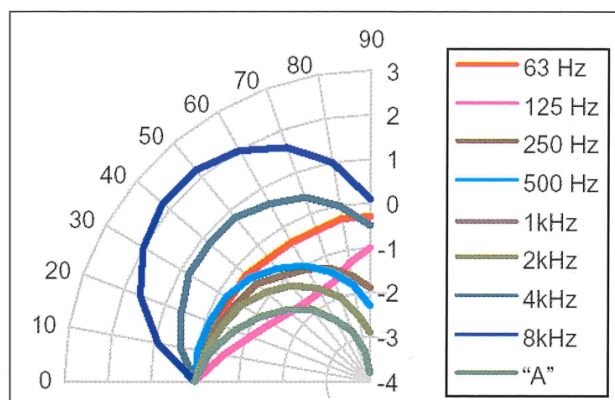
Renkaan sivuille ääntä säteilee vieläkin vähemmän, noin 5 - 10 dB vähemmän kuin renkaan etu- ja takapuolelle. Melun leviämistä eri suuntiin renkaan ympärillä on havainnollistettu kuvassa 3.5.



Kuva 3.5: Rengasmelun spektri mitattuna eri pisteistä renkaan ympäriltä noin 0,4 m etäisyydeltä. Melu leviää erityisesti renkaan etu- ja takapuolelle, renkaan sivujen jäädessä varjoon. [7]

3.3.2 Vertikaalinen suuntaavuus

Vertikaalinen suuntaavuus on horisontaalista suuntaavuutta paljon vähemmän tutkittu ilmiö, eikä suuntaavuus tässä suunnassa olekaan niin selkeää kuin horisontaalisessa suunnassa. Vertikaaliseen suuntaavuuteen vaikuttavat erityisesti auton kori ja jossain määrin myös torvi-ilmiön suuntaavuus. Kuvassa 3.6 on havainnollistettu 110 km/h ajavan henkilöauton suuntaavuutta eri oktaavikaistoilla. Kuvasta huomaamme vertikaalisen suuntaavuuden olevan merkittävää yli 2 kHz taajuuksilla, jotka eivät vaikuta huomattavasti kokonaismelutasoon. Kuvassa on mukana voimansiirrosta aiheutuva melu, joka vaikuttaa kuitenkin vain kahdella alimmalla taajuuksikaistalla.



Kuva 3.6: Henkilöauton melun vertikaalinen suuntaavuus eri oktaavikaistoilla. Pallokoordinaatiston kulma ilmoittaa suunnan ja etäisyys keskipisteestä äänenpainetasoon eron vaakatasoon nähden. [7]

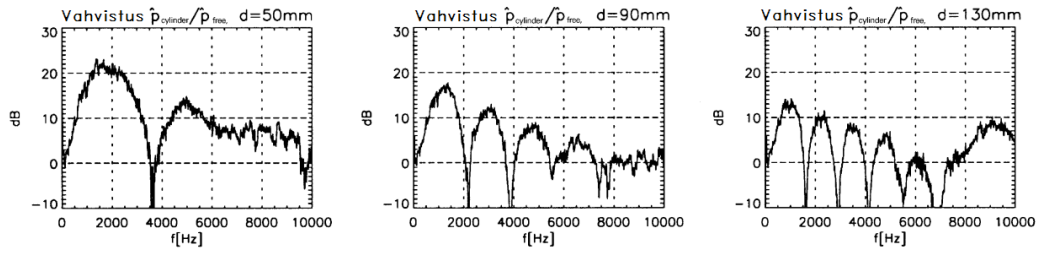
3.3.3 Torvi-ilmiö

Renkaan ja tienpinnan kosketuspinnan molemmille puolille muodostuu eksponentiaalisesti levenevä akustinen “torvi”. Torvi vähentää melun lähteen ja ympäröivän ilman välistä akustista impedanssia, jolloin renkaassa syntyvä melu leviää herkemmin ympäristöön. Torvi-ilmiön uskotaan olevan tärkein tekijä rengasmelun leviämisessä.

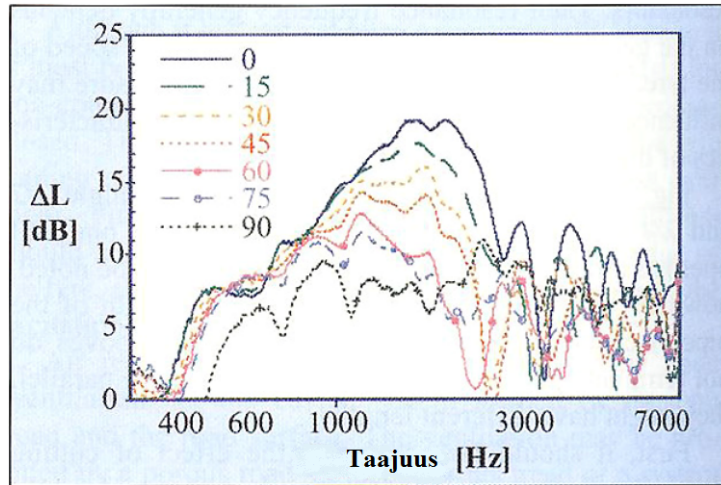
Torvi-ilmiö vaikuttaa melun voimakkuuden lisäksi vahvasti myös melun suuntaavuuteen. Renkaan pyörimissuunnassa torven tuoma vahvistus voi olla jopa yli 20 dB, mutta siirryttäessä renkaan sivulle vahvistus nopeasti laskee ja 90 asteen kulmassa vahvistus putoaa lähes nolleen. Myös pyörimissuunnassa vahvistus putoaa varsin nopeasti etäisyyden kasvaessa, ollen noin 5 dB 20 cm etäisyydellä kosketuspinnasta. Kuvassa 3.7 on havainnollistettu torvi-ilmiön tuoman vahvistuksen muuttumista etäisyyden mukaan, ja kuvassa 3.8 vahvistuksen muuttumista suunnan mukaan.

3.4 Rengasmelun emissioon vaikuttavat tekijät

Rengasmelun eri syntymekanismeihin ja niiden synnyttämän melun tasoon vaikuttaa joukko erinäisi muuttujia. Näitä ovat niin renkaisiin liittyvät muuttujat kuten lukumäärä, paine, dimensiot ja kuviointi, kuten myös tien pinnan muuttujat, vallitsevat sääolosuhteet sekä ajotyyli.



Kuva 3.7: Torvi-ilmion tuoma vahvistus taajuuden funktiona renkaan edestä 50 mm, 90 mm ja 130 mm etäisyydellä. [18]



Kuva 3.8: Torvi-ilmion tuoma vahvistus eri kulmilla ajosuuntaan nähden. [7]

3.4.1 Renkaiseen liittyvät muuttujat

3.4.1.1 Renkaiden lukumäärä

Ajoneuvon jokaista rengasta voidaan pitää yksittäisenä melulähteenä. Näin ollen renkaiden lukumäärän lisääminen kasvattaa rengasmelun kokonaistasoa. Ideaalitapauksessa, jossa kaikki renkaat ovat saman tyyppisiä ja ajoneuvon paino on jakautunut tasaisesti näiden välille, renkaiden lukumäärän melun kokonaistason tuoma lisäys ΔL noudattaa seuraavaa kaavaa:

$$\Delta L = 10 \log(n/n_{ref}) \quad (3.6)$$

missä n on renkaiden todellinen lukumäärä ja n_{ref} on renkaiden lukumäärä referenssitilanteessa. Kuvassa 3.9 on esitetty yleisimpien ajoneuvomal-

lien melutasoja suhteessa nelirenkaisen henkilöauton A-painotettuun melutasoon. Rengasmelun syntymekanismien monimutkaisuudesta ja suuntaavuudesta johtuen tilanne ei välttämättä ole näin yksinkertainen. Arvoja voidaan kuitenkin pitää paikkansa pitävinä yhden desibelin tarkkuudella.

Renkaiden lukumäärä	Esimerkkejä renkaiden sijoittumisesta	Vaikutus äänenpainetasoon [dB(A)]	
		Ideaalitapaus	Korjattu
1		-6.0	-6.0
2		-3.0	-3.1
4		REFERENSSI	REFERENSSI
6		+1.8	+1.5
8		+3.0	+2.8
10		+4.0	+3.7
10		+4.0	+2.6
12		+4.8	+3.2
14		+5.4	+4.3
16		+6.0	+4.7
18		+6.5	+5.1
20		+7.0	+5.5
22		+7.4	+5.9

Kuva 3.9: Renkaiden lukumäärän arvioitu vaikutus kokonaisäänitasoon suhteessa neljän renkaan referenssitiasoon. Oikean puoleinen sarake sisältää korjauksen, joka kompensoi rengaskotelon vaikutuksen.[7]

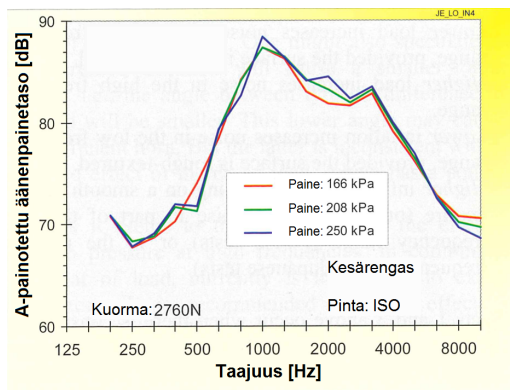
3.4.1.2 Renkaiden paine ja kuorma

Renkaan paineen ja kuorman vaikutus rengasmeluun on yhteydessä renkaan pintakuvioon ja dimensioihin, jotka kaikki vaikuttavat suoraan renkaan ja tien välisen kosketuspinta-alan kokoon. Koska näiden parametrien koot ja suhteet vaihtelevat suuresti eri rengastyyppejen ja ajoneuvojen välillä, vaihte-

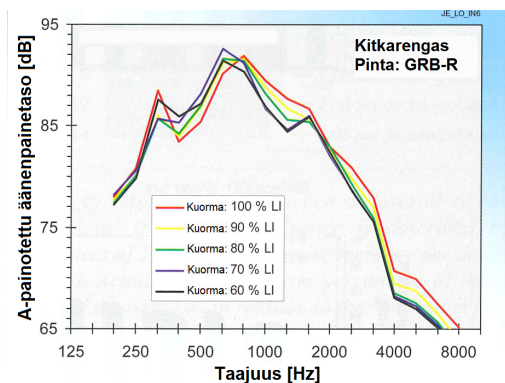
levat paineesta ja kuormasta aiheutuvat muutokset melupäästöihin vastaavasti.

Rengasmelun äänitaso kasvaa keskimäärin 0,7 - 1,5 dB(A) ajoneuvon kuorman kaksinkertaistuessa ja 1 - 2 dB(A), jos rengaspainetta kasvatetaan kuorman lisäyksen mukaisesti. Muutos äänenpainetasossa voi suurimmillaan olla kuitenkin jopa 6 dB(A)[7]. Kuvissa 3.10 ja 3.11 on esitetty rengasmelun spektrin käyttäytymistä erikokoisilla kuormilla ja rengaspaineilla. Vaikka tuloksissa ilmenee suurtakin vaihtelua mittausten välillä, voidaan paineen ja kuorman vaikutuksista yleisesti todeta seuraavaa:

- Suurempi kuorma voi *vähentää* melua matalilla taajuuksilla. Riippuen pinnan kuvioinnista melu voi tietyissä tapauksissa myös *kasvaa*.
- Suurempi kuorma *kasvattaa* melua keski- ja korkeilla taajuuksilla, muutoksen ollessa noin 3-4 dB kuorman kaksinkertaistuessa.
- Korkeampi rengaspaine *vähentää* melua matalilla taajuuksilla. Jopa 8 dB muutoksia on mitattu paineen kasvaessa 20 %.
- Korkeampi rengaspaine *kasvattaa* melua keski- ja korkeilla taajuuksilla, muutoksen ollessa noin 2-3 dB paineen kasvaessa 20 %.



Kuva 3.10: Rengasmelun spektri kolmella eri rengaspaineella. [7]



Kuva 3.11: Rengasmelun spektri viidellä eri kuormituksella. [7]

3.4.1.3 Renkaan dimensioid

Renkaan dimensioiden vaikutusta rengasmelun emissioon on vaikea arvioida, sillä muutokset renkaan dimensioissa vaikuttavat suoraan myös muihin rengasmelumekanismiin. Renkaan leveyden vaikutus meluun on noin 0,4 dB

10 mm kasvua kohti tai 4 dB renkaan leveyden kaksinkertaistuessaa. Näistä jälkimmäistä voidaan pitää tarkempana, sillä yli 200 mm leveillä renkailla leveyden kasvun vaikutus heikkenee runsaasti.

Renkaan korkeuden vaikutuksesta melutasoon voidaan sanoa sitäkin vähemmän, sillä sen vaikutus meluun ei ole yhtä selkeä ja siihen vaikuttaa paljolti tienpinnan karheus.[7]

Ilman syrjäyttämiseen liittyvien mekanismien suhde renkaan dimensioihin

Leveämmän renkaan edestä on syrjäytettävä enemmän ilmaa, joka voimistaa erityisesti ilman pumppaamisesta sekä pilliresonanssista aiheutuvaa melua. Sekä renkaan leveyden, että korkeuden kasvattaminen voimistavat erityisesti torvi-ilmiötä tien ja renkaan välisen kulman pienentyessä ja niiden väliin syntyvän torven koon kasvaessa.

Iskuperäisen melun suhde renkaan leveyteen

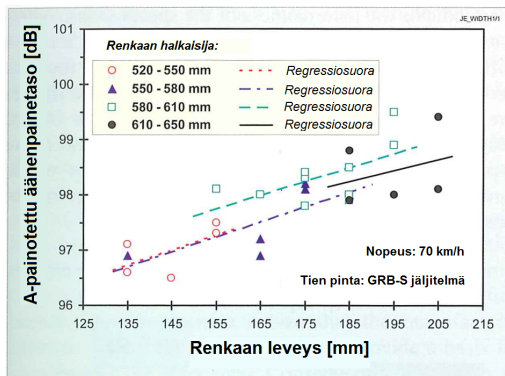
Leveämpi rengas tarkoittaa sitä, että suurempi määrä renkaan kuviopaloja iskeytyy tien pintaan vastaavassa ajassa. Tämä johtaa positiiviseen korrelaatioon renkaan leveyden ja melun välillä, kuten on havainnollistettu kuvassa 3.12.

Iskuperäisen melun suhde renkaan halkaisijaan

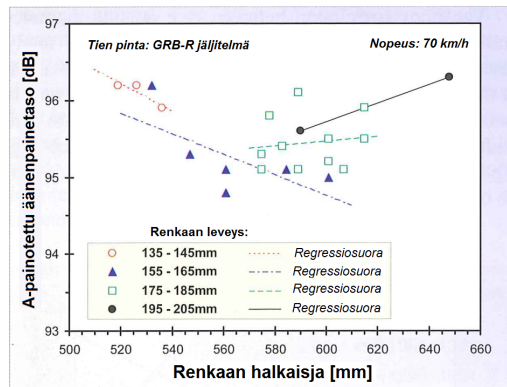
Karkealla päällysteellä iskuperäinen melu dominoi, jolloin renkaan iskukulma on tärkeä. Renkaan säteen kasvaessa kulma, jossa renkaan kuviopalat iskeytyvät tien pintaan, pienenee. Tällöin myös aika kuviopalan ensikosketuksesta maksimitunkeutumiseen kestää pidemmän ajan. Suurempi halkaisija johtaa näin ollen pienempään meluun, kuten on esitetty kuvassa 3.13. Näin on kuitenkin vain karkealla päällysteellä. Sileällä päällysteellä torvi-ilmiöllä on merkittävämpi vaikutus meluun ja renkaan suurempi halkaisija aiheuttaa enemmän melua.

3.4.1.4 Kumin kovuus

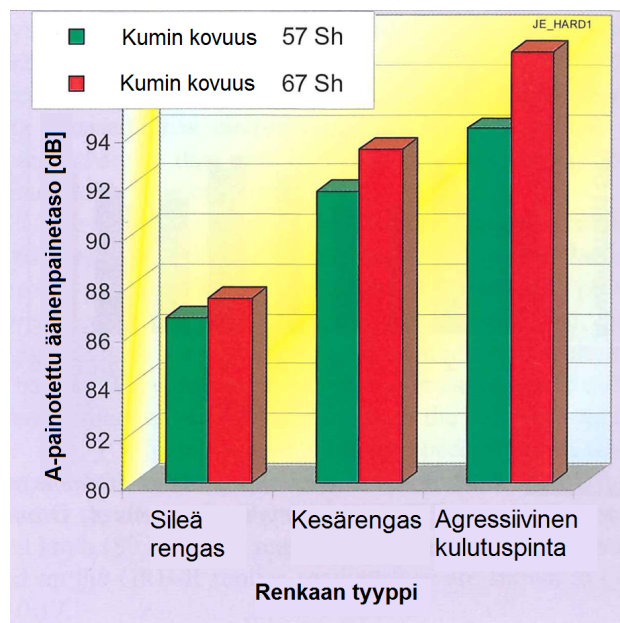
Elastisemmän kumin käyttö renkaissa, yhdistettynä oikeaan renkaan kuviointiin, voi laskea rengasmelun tasoa jopa 2 - 3 dB. Kuvassa 3.14 on esitetty äänitasoja kolmella eri renkaan kuvioinnilla niin perinteisellä kuin pehmeämmällä kumilla, josta ilmenee kumin pehmeiden vaikuttavan erityisesti kuvioaloista aiheutuvaan meluun.



Kuva 3.12: Renkaan leveyden vaikutus rengasmeluun sileällä päällysteellä. [7]



Kuva 3.13: Renkaan halkaisijan vaikutus rengasmeluun karkealla päällysteellä. [7]



Kuva 3.14: Kumin kovuuden vaikutus rengasmeluun. Kovuuden yksikönä Shore [Sh], joka mittaa jousen painauma kumiin.[7]

3.4.1.5 Renkaan kuviointi

Lähes kaikki rengasmelumekanismi liittyy renkaan kuviointiin, joten on selvää, että renkaan kuviointi on kaikista renkaan ominaisuuksista se, jolla on helpointa vaikuttaa melun kokonaistason. Oikealla renkaan kuviointi-

nin valinnalla voidaan saavuttaa etuja niin melua vähentämällä kuin pitoa parantamalla. Melun kannalta huonoin kuviointi sisältää säännöllisiä rakenteita. Tällöin melu voimistuu erityisesti kapeilla taajuualueilla, kaavan 3.7 mukaisesti:

$$f = \frac{v}{L} \quad (3.7)$$

missä f on taajuus [Hz],
 v on renkaan vierintänopeus [m/s]
 ja L on kuvioinnin säännöllisen osion koko [m].

Renkaan kuvioinnista aiheutuvaa melua voidaan estää käyttämällä renkaassa kuviointia, joka on mahdollisimman epäsäännöllinen. Satunnaistamiseen kuuluu niin kuvion sekoittaminen koko renkaan pituuden matkalta, kuin renkaan vasemman ja oikean reunan kuvioinnin tekeminen epäsymmetrisesti tai epäsynkronoidusti.

Kuvioinnissa ei myöskään saa olla suljettuja uria, joista ilma ei pääse virtaamaan vapaasti ulos kuvioinnin painautuessa tien pintaa vasten. Melu paheenee erityisesti silloin, kun pyörimissuunnan suuntaisista urista ei ole vapaata virtausta renkaan sivuille.

Pilliresonanssin vaimentamiseen on olemassa ratkaisuna myös "meluesteiden" rakentaminen kuvioinnin uriin. Este koostuu kahdesta kumisesta "läpistä", jotka vaimentavat urassa kulkevan akustisen aallon estämättä kuitenkaan ilman virtausta. Meluesteiden käytöllä voidaan rengasmelun kokonaistasoa laskea 1 dB(A).

3.4.1.6 Renkaan kuluminen

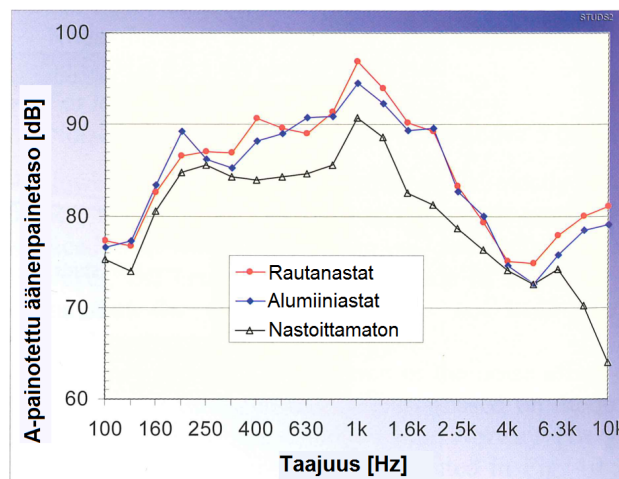
Renkaan kulumisen ja ikääntyminen vaikuttavat renkaan rakenteeseen sekä itse kumin ominaisuuksiin. Renkaan kuluessa renkaan kuviointi muuttuu ja kumi kovettuu, vaikuttaen lähes kaikkiin rengasmelun syntyyn vaikuttaviin mekanismeihin. Renkaan kulumisen vaikutusta rengasmeluun on täten lähes mahdotonta ennustaa vaikutusten vaihdellessa runsaasti eri rengas- ja päällystetyyppien välillä. Erot voivat olla suurimmillaan jopa 6 dB korkeampia verrattuna vastaavaan renkaaseen uutena. Toisaalta kulunut kitkarengas voi joillakin päällysteillä olla jopa uutta hiljaisempi. [7]

3.4.1.7 Nastarenkaat

Nastarenkaiden vaikutus rengasmeluun on selkeä, nastoituksen nostaessa äänenpainetasoa 3 - 10 dB(A) riippuen rengastyypistä ja nopeudesta. Nastat

tuottavat melua iskeytyessään päällysteeseen, tuottaen rapisevan äänen. Nopeuden kasvaessa yksittäisiä napsahduksia ei enää pysty erottamaan ja yli 50 km/h nopeuksilla ääntä voidaan pitää jatkuvana.

Nastat kasvattavat melua noin 2 - 6 dB taajuusalueella 500 - 5000 Hz ja 5 - 15 dB 5000 Hz yläpuolella. Kahden eri nastarengastyypin spektriä on verrattu nastattomaan talvirenkaaseen kuvassa 3.15.



Kuva 3.15: Talvirenkaan melun spektri kahdella eri nastatyypillä ja ilman nastoja.[7]

3.4.2 Ajoneuvon rakenne

Ajoneuvon rakenteeseen liittyvät osatekijät vaikuttavat melua kasvattavasti pääosin ajoneuvon välittömässä läheisyydessä tehtäviin mittauksiin sekä ajoneuvon sisätilan melutasoihin. Suuremmalla etäisyydellä vaikutukset havaittuun melutasoon ovat merkityksettömiä. Suurimmat vaikutukset melun leviämiseen tekevät renkaan kotelointi sekä maavara. Molemmat muuttavat ilman virtausta renkaan läheisyydessä ja muokkaavat aerodynaamisten rengasmelun mekanismien käyttäytymistä.

Rengaskotelon vaikutuksesta rengasmeluun on mitattu ajoneuvon läheisyydessä jopa 2 dB:n vaihtelua eri koteloiden välillä, kotelon toimiessa kaiku-kopan kaltaisena vahvistimena. Vaihtelu eri ajoneuvojen ja rengastyypin välillä on kuitenkin niin suurta, että renkaan koteloinnin vaikutusta rengasmeluun voidaan pitää lähes satunnaisena. Lisäksi etäisyyden kasvaessa erot mittaustulosten välillä pienenevät.

3.4.3 Tienpintaan liittyvät muuttujat

Tässä kappaleessa käydään läpi tien pinnan meluun vaikuttavia parametreja, mutta niiden meluominaisuuksia ja optimointia käsitellään tarkemmin osiossa 4.2.

Tyypillinen tiheä asfalttibetonipäällyste (AB) koostuu seuraavista ainesosista:

- Kiviä ja soraa, joiden raekoko on 2 - 16 mm, kattaen noin 40 - 55 % päällysteen kokonaismassasta.
- Hiekkaa, jonka raekoko 0,06 - 2 mm, 35 - 45 % osuudella kokonaismassasta.
- Täyteaineena erittäin hienoa hiekkaa ($< 0,06$ mm). 5 - 10 % kokonaismassasta.
- Bitumi tai vastaava sidosaine, 4 - 8 %.

Tien pinta koostuu näin ollen pääosin usean kokoisista kivistä sekä hiekasta, sidosaineen muodostaessa pienimmän osan koko päällysteestä. Kun päällysteen sidosaineena käytetään bitumin sijasta sementtiä, saadaan sementtibetonipäällystettä, jonka valmistusaineiden keskinen suhde eroaa kuitenkin suuresti asfalttipäällysteestä.

Taulukko 3.2: Päällysteen ominaisuuksia ja niiden potentiaalinen vaikutus rengasmeluun [7].

Parametri	Vaikutuksen aste
Mikrotekstuuri	Vähäinen - kohtalainen
Makrotekstuuri	Erittäin korkea
Megatekstuuri	Korkea
Epätasaisuus	Pieni
Huokoisuus	Erittäin korkea
Kerroksen paksuus	Korkea (huokoisille päällysteille)
Adheesio (normaalin suuntainen)	Vähäinen - kohtalainen
Kitka (tangentin suuntainen)	Vähäinen - kohtalainen
Jäykkyys	Epävarma, kohtalainen (?)

Kuten renkaan rakenteen kohdalla myös tien rakenteen yksityiskohdat vaikuttavat syntyvään rengasmeluun, sen voimakkuuteen ja taajuusjakaumaan.

Rengasmeluun oletettavasti vaikuttavia tienpinnan parametreja sekä niiden painoarvoja kokonaismelusta on lueteltu taulukossa 3.2. Näistä makrotekstuurin ja huokoisuuden meluominaisuudet tunnetaan selkeimmin.

Tienpinnan tekstuurin määrittelyyn ja mittaamiseen on käytössä kaksi eri parametria: amplitudi, eli pystysuora ero syvyydessä, sekä aallonpituus, eli tekstuurin vaakasuora jaksollisuus. Tienpinnan rakenne on määritelty kolmella eri aallonpituudella [19]:

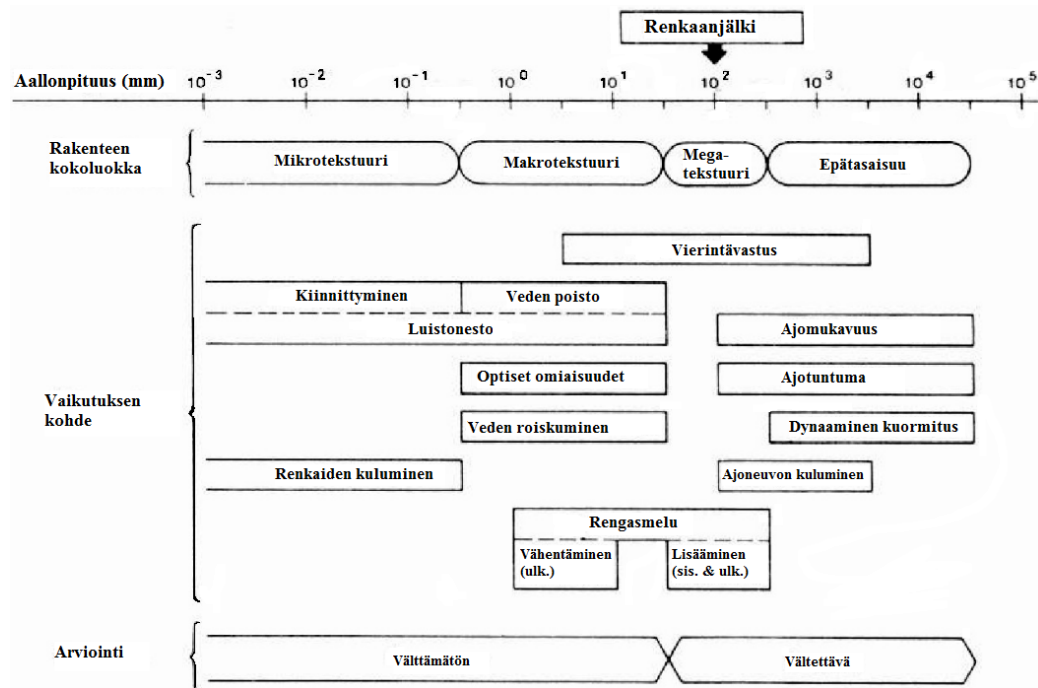
- Mikrotekstuuri (rakenteen aallonpituus alle 0,5 mm).
Rakenteen kokoluokka, joka syntyy pääosin päällysteen hienojakoisempien osasten eli hiekan ja sidosaineen ominaisuuksista. Pinnanmuotojen amplitudi välillä 0,001 - 0,5 mm. Vaikuttaa kaikista tien pinnan ominaisuuksista eniten renkaan ja tien väliseen tarrautumiseen.
- Makrotekstuuri (rakenteen aallonpituus 0,5 - 50 mm).
Makrotekstuuri muodostuu päällysteen karkeampien osasten ja niiden suhteen myötä. Amplitudi vaihtelee välillä 0,1 - 20 mm. Makrotekstuuri vaikuttaa erityisesti veden liikkumiseen tien pinnalla sekä päällysteen huokoisuuteen.
- Megatekstuuri (rakenteen aallonpituus 50 - 500 mm).
Megatekstuuri ilmenee päällysteen aaltoiluna, kuoppaisuutena tai muina vaurioiksi tulkittavina ominaisuuksina, eikä se ole yhteydessä päällysteen raekokoon. Amplitudi vaihtelee välillä 0,1 - 50 mm. Megatekstuuri on yleensä ei toivottu ominaisuus, jolla on selkeästi haitallisia vaikutuksia niin kitkaan kuin meluun.

Näitä suuremmat aallonpituudet luokitellaan tien epätasaisuutena, eikä niillä ole huomattavaa vaikutusta päällysteen meluominaisuuksiin. Niillä, kuten kaikilla muillakin aallonpituuksilla, on kuitenkin vaikutusta moniin muihin ajo-ominaisuuksiin, joita on havainnollistettu paremmin kuvassa 3.16.

3.4.4 Nopeus

Ajonopeuden muutokset vaikuttavat eri tavoin rengasmelun kaikkiin osaluoksiin. Yleisesti voidaan todeta kaikkien melulähteiden emissioiden kasvavan logaritmisesti kaavan 3.8 mukaisesti:

$$L_p \sim 10\log(v/v_0)^k = k10\log(v/v_0) \quad (3.8)$$

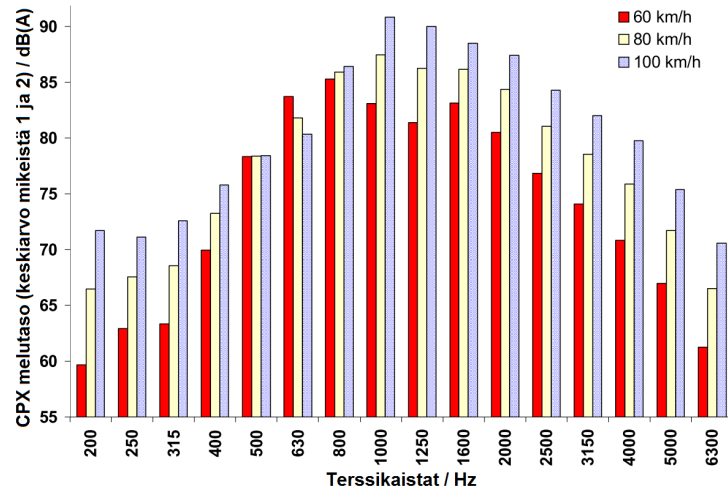


Kuva 3.16: Mikro-, makro- ja megatekstuuri ja niiden vaikutukset päällysteen eri toimintoihin.[20]

missä L_p on äänenpainetaso [dB],
 v on ajoneuvon nopeus,
 v_0 on referenssinopeus,
 ja k on nopeuden eksponentti.

Eri melulähteiden nopeuden eksponentteja on esitetty kuvassa 3.3, josta huomaamme takertumis-luiskahdus -mekanismien ja ilman pumppaamisesta aiheutuvan melun kasvavan herkimmin nopeuden suhteen, Helmholtz- ja pilli-resonanssin ollessa täysin nopeudesta riippumattomia.[17]

Yleisesti ottaen liikenteen nopeudella on suuri vaikutus ajoneuvon kokonaismelun määrään. Kokonaismelutason voidaan todeta kasvavan keskimäärin 2 - 3 dB nopeuden kasvaessa 20 km/h [7]. Erityisesti korkeat taajuuudet (>1 kHz) voimistuvat nopeuden kasvaessa. Kuvassa 3.17 on havainnollistettu yhden ajoneuvon melupäästön spektrin muuttumista kolmella eri nopeudella.



Kuva 3.17: Lähimittausmenetelmällä mitatun rengasmelun spektri kolmella eri nopeudella [21]

3.4.5 Ympäristötekijät

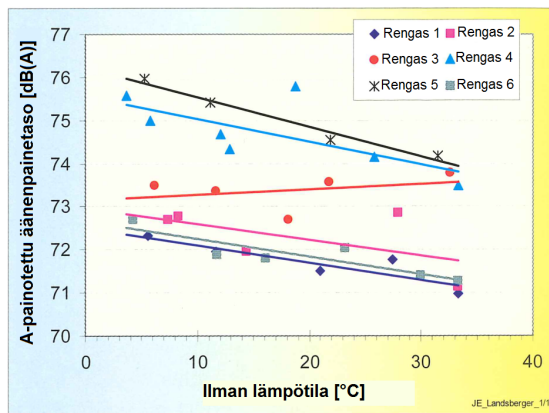
3.4.5.1 Lämpötila

Rengasmelu on käänteisesti verrannollinen lämpötilaan nähden, vaikkakin selkeää suhdetta rengasmelun ja ilman lämpötilan välille ei voida asettaa. Rengasmelun syntymekanismeja, joihin lämpötilan muutokset vaikuttavat, ei tarkkaan tunneta ja vaikutukset eri renkaiden välillä vaihtelevat suuresti. Oletettavasti lämpötilan nousu kasvattaa ainakin päällysteen elastisuutta ja pehmentää renkaiden kumia. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta rengasmelun laskevan 1 dB lämpötilan noustessa 10 °C. Ilman lämpötilan ja rengasmelun suhdetta voidaan kuvata kaavan 3.9 mukaisesti:

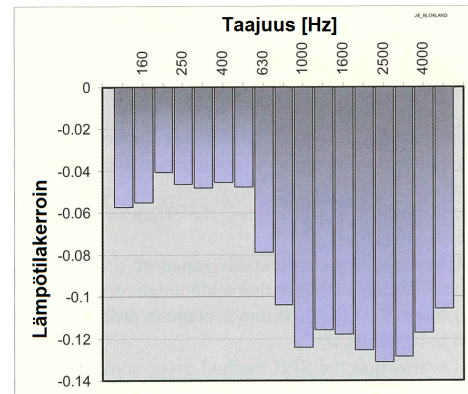
$$L = a + bT \quad (3.9)$$

missä L on äänenpainetaso [dB],
 T on lämpötila [°C],
 b on lämpötilakerroin [dB/°C],
 ja a on vakio.[7]

Lämpötilakerroin vaihtelee eri renkaiden ja lähteiden välillä, vaihdellen arvojen -0,02 ja 0,130 dB/°C välillä. Kuvassa 3.18 on esitetty muutamien eri renkaiden äänitasojen vaihtelua lämpötilan funktiona. Muutosta tapahtuu myös



Kuva 3.18: Äänitason ja ilman lämpötilan suhde eri renkailla, nopeudella 80 km/h. [7]



Kuva 3.19: Lämpötilakerroin terssikaistoittain "normaaleilla" renkailla. [7]

melun taajuusjakaumassa, kertoimen ollessa vähäinen matalilla taajuuksilla ja kasvaen yli 1000 Hz taajuuksilla. Kuvassa 3.19 on esitetty lämpötilakerroimen arvoja terssikaistoittain testitilanteessa.

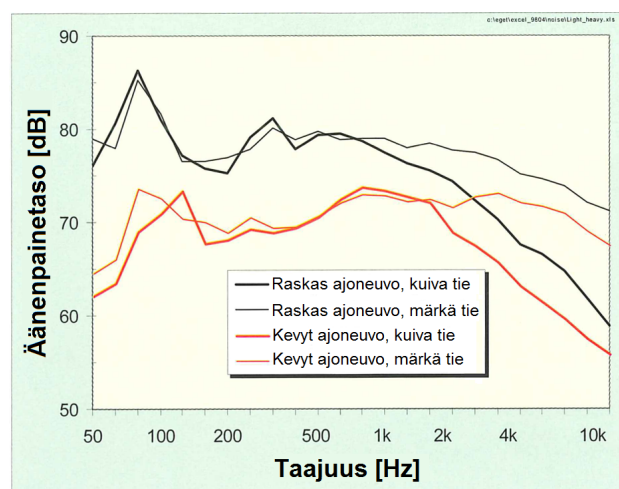
Lämpötilakerroin vaihtelee myös päällysteiden välillä. Kertoimien on kokeellisesti todettu olevan pienempiä tiheällä asfaltilla kuin huokoisella asfaltilla ja suurempia sementti- kuin asfalttikonipäällysteellä. Päällysteiden väliset erot kuitenkin vähenevät tutkittaessa tarpeeksi suurta joukkoa eri renkaita. [22]

3.4.5.2 Tienpinnan kosteus

Vesi tien pinnalla lisää rengasmelua, erityisesti korkeilla yli 1000 Hz taajuuksilla. Veden tuoma lisäys meluun korostuu erityisesti matalilla nopeuksilla, merkityksen pienentyessä nopeuden kasvaessa. Taulukossa 3.3 on karkea arvio veden vaikutuksesta henkilöauton äänitasoon kolmella eri kosteuden asteella. Kuvassa 3.20 on esitetty raskaan ja kevyen ajoneuvon melutasoja kuivalla ja märällä tiellä.

3.4.5.3 Ilman kosteus ja tuuli

Tuulella ei ole suoraa vaikutusta melutasoihin ajoneuvon välittömässä läheisyydessä. Lähellä ajoneuvon runkoa turbulenssin määrä kasvaa, häiriten pääosin ajoneuvon välittömässä läheisyydessä tapahtuvia mittauksia. Tuuli kuitenkin kasvattaa taustamelun määrää, nostaen myös kauempana mi-



Kuva 3.20: Raskaan ja kevyen ajoneuvon spektrit kuivalla ja märällä tiellä. [7]

Taulukko 3.3: Arvio tien kosteuden vaikutuksesta rengasmeluun eri nopeuksilla. [7]

Kosteuden aste	0 - 60 km/h	61 - 80 km/h	81 - 130 km/h
Kuiva	ref	ref	ref
Kostea, tihkusateesta tai maantiesuolasta johtuva	2 dB	1 dB	0 dB
Märkä, kohtalainen sade	4 dB	3 dB	2 dB
Märkä, rankka sade	6 dB	4 dB	3 dB

tattuja äänenpainetasoja sekä vääristää saatuja arvoja sen suhteen ollaanko myötä- vai vastatuulen puolella mitattavasta kohteesta. Siksi mittausten aikaisen tuulen nopeuden tulisikin olla alle 5 m/s.

Ilman kosteudella ei ole havaittu olevan vaikutusta rengasmeluun muuta kuin niissä tapauksissa joissa kosteus on riittävän suuri, jotta kosteus alkaa tiivistyä pisaroiksi tien pintaan.[7]

Luku 4

Melua vaimentavat päällysteet

4.1 Hiljaisen päällysteen määritelmä

Käsiteltäessä hiljaisia ja melua vaimentavia päällysteitä sekä niiden ominaisuuksia, joudutaan pohtimaan mikä on hiljainen päällyste. Ongelmana nimittäin on, ettei virallista määritelmää hiljaisille päällysteille ole. Periaatteessa lähes kaikkia päällystetyyppejä voidaan pitää hiljaisina, jos niitä verrataan esimerkiksi kaikkein meluisimpaan päällystetyyppiin eli sementtibetoni-päällysteeseen. Tämä kuitenkin tekisi käsitteestä täysin merkityksettömän, joten käsitteen tiukempi rajausta on tarpeen. Ulf Sandberg ja Jerezy A. Ejsmont ehdottavatkin hiljaisille päällysteille seuraavaa määritelmää:

“Hiljainen tienpinta” on tien pinta, joka vuorovaikutuksessa pyörivän renkaan kanssa vaikuttaa ajoneuvon meluun siten, että se aiheuttaa vähintään 3 dB(A)(puolen tehon) pienemmän ajoneuvon melun kuin mitä saadaan tavanomaisista ja “kaikkein yleisimmistä” tien pinnoista.[7]

Tätä määritelmää käyttäen hiljaiset päällysteet vaihtelevat eri maitten ja aikojen välillä, riippuen siitä, mikä kulloinkin mielletään tyypilliseksi päällystetyypiksi. Useimmissa teollistuneissa maissa tyypillisiä päällysteitä ovat tiheä asfalttibetoni (AB) ja kivimastikiasfaltti (SMA)[7], joista Suomessa käytetyintä on AB raekoolla 10-20 mm. Standardissa ISO 11819-1 referenssikohteena käytetään tiheää, sileätekstuurista asfalttibetonipäällystettä, jonka maksimi raekoko on 11 - 16 mm [23]. Tässä työssä käytetään pääsääntöisesti termiä "melua vaimentava päällyste", jolla tarkoitetaan kaikkia niitä päällysteitä, joilla voidaan saavuttaa melutason vaimennusta asfalttibetoniin nähden.

Hiljaiset päällysteet voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: huokoiset ja ei-huokoiset. Huokoisten päällysteiden vaimennus perustuu huokoisuuteen, kun taas ei-huokoisissa päällysteillä vaimennus saavutetaan pinnan tekstuurin pehmentämisellä. Tekstuurin pehmentäminen tarkoittaa käytännössä käytettävän raekoon rajoittamista ja päällysteen tehokkaampaa tiivistämistä. [7]

4.2 Päällysteen hiljaisuuden osatekijät

4.2.1 Pinnan tekstuuri

Päällysteen pinnan epäsäännöllisyydet muodot sen tasaisesta vaakalinjasta muodostavat pinnan rakenteen eli tekstuurin. Amplitudiltaan negatiivinen tekstuuri, eli tien pinnasta alaspäin ulottuva, on melun kannalta parempaa positiivisen tekstuurin, eli tien pinnasta ylöspäin ulottuvan, kasvattaessa rengasmelua ja kitkaa. Positiivinen tekstuuri myös kuuluu negatiivista nopeammin, heikentäen pitkällä aikavälillä päällysteen pito-ominaisuuksissa. [24]

4.2.1.1 Makro- ja megatekstuuri

Kuten renkaan kuviopalojen aiheuttamassa melussa (kaava 3.7), pinnan rakenteen aallonpituudella on suora yhteys syntyvän melun spektriin. Makrorakenne vaikuttaa kuitenkin eri aallonpituuksilla rengasmelun eri parametreihin, ollen matalilla taajuuksilla yhteydessä renkaan kuviopalojen iskumekanismin ja korkeilla taajuuksilla ilman siirtymään. Makrotekstuuria voidaan näin optimoida seuraavasti:

- Makrotekstuurin aallonpituudella 0,5 - 10 mm melu *vähenee* tekstuurin amplitudin kasvaessa.
- Makro- ja megatekstuurin aallonpituudella 10 - 500 mm melu *kasvaa* tekstuurin amplitudin kasvaessa.[7]

Tekstuurin muokkaaminen ei ole täysin ongelmaton, sillä rakenteen eri aallonpituudet tyypillisesti korreloivat keskenään. Päällysteessä pitäisi välttää suuria, yli 10 mm raekokoja jos halutaan minimoida rakeista syntyvää melua. Käytettävän rakeen maksimikoon pienentäminen vaikuttaa kuitenkin samalla myös tekstuurin amplitudiin, pienentäen amplitudia kaikilla taajuuksilla ja vähentäen näin päällysteen kykyä vaimentaa melua.

4.2.1.2 Mikrotekstuuri

Mikrotekstuurin tutkimiseen ja mittaaminen tiestä ei ole olemassa käytännöllistä tapaa, joten sen yhteyttä renkaan meluominaisuuksiin ei tunneta yhtä tarkasti kuin makrotekstuurin kohdalla. Mikrotekstuurilla voidaan kuitenkin olettaa olevan vähäinen vaikutus päällysteen hiljaisuuden kannalta.

Mikrotekstuurin lisäys kasvattaa kitkaa tien ja renkaan välillä, joka voimistaa takertumis-luiskahdus ja -napsahdus -mekanismeja, voidaan nostaa rengasmelua jopa 2-3 dB verrattuna vähäisen mikrotekstuurin päällysteeseen. Tekstuurin runsas vähentäminen ei kuitenkaan ole erityisen kannattavaa, sillä mikrotekstuuri on tärkeä pitoa tuova mekanismi alle 80 km/h nopeuksilla.[7]

4.2.1.3 Isotrooppinen ja anisotrooppinen tekstuuri

Tavallisessa asfalttibetonipäällysteessä pyritään saavuttamaan *isotrooppinen* tekstuuri eli pinnan rakenne, joka on samanlainen tarkastelusuunnasta riippumatta. Tämän vastakohtana on *anisotrooppinen* tekstuuri, jossa päällysteen ominaisuudet muuttuvat tarkastelusuunnan mukaan. Isotrooppiset tekstuurit ovat pääosin satunnaisia, anisotrooppisten sisältäessä säännöllisiä elementtejä. Asfalttipohjaisissa päällysteissä pyritään välttämään anisotrooppista tekstuuria, joka on usein seurausta epätasaisen kiviaineksen käytöstä tai väärästä kivi- ja sidosaineiden suhteesta. Kuvassa 4.1 on havainnollistettu iso- ja anisotrooppista pintatekstuuria.



Kuva 4.1: Vasemmalla anisotrooppinen tekstuuri ja oikealla isotrooppinen tekstuuri. Kiviaineksen epätasainen jakautuminen kasvattaa pinnan megatekstuuria.[7]

Isotrooppisesta tekstuurista saadaan anisotrooppinen kuvioimalla päällystettyä päällystyksen yhteydessä, joka tyyppillisesti tarkoittaa ajosuunnan mukai-

sia uria tien pinnassa. Oikein tehty uritus vähentää huomattavasti kaikkia rengasmelun mekanismeja paitsi putkiresonanssia, joka voi päinvastoin voimistua kuvioinnista, sekä parantaa veden poistumista renkaan edestä. Kuvioinnin ollessa poikittain ajosuunnan kanssa melu sen sijaan kasvaa dramaattisesti, kuvioinnin asettuessa täydellisesti linjaan renkaan koko leveydeltä. Näin käy erityisesti katukivien kohdalla. [7]

Anisotrooppinen teksturointi on tarpeellista sementtibetonipäällysteissä, joiden pienemmästä kivien raakoosta johtuen niiden makrotekstuuri on luonnostaan vähäisempää. Oikealla urituksella sementtibetonipäällysteiden melutasoja voidaan saada laskettua huomattavasti.[25]

4.2.2 Huokoisuus

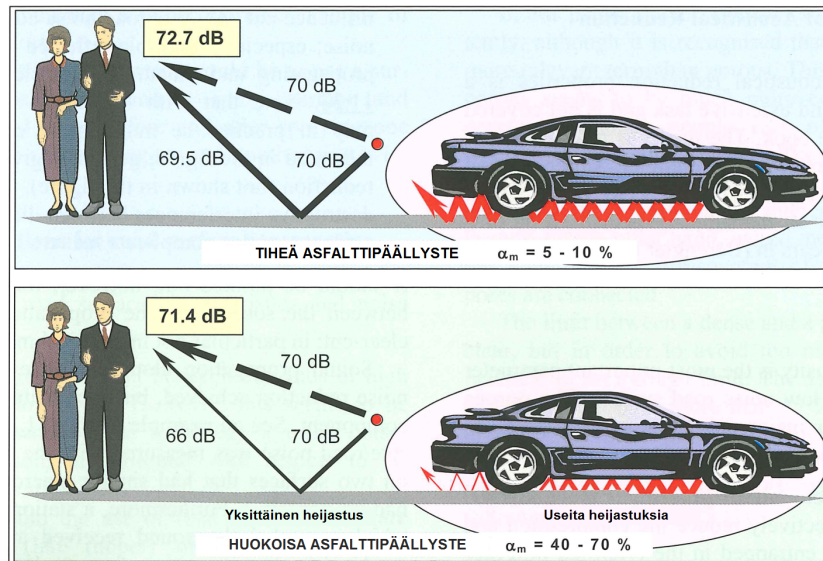
Päällysteen huokoisuudella viitataan päällysteen rakenteisiin jääneiden ilmataskujen määrään päällysteen kokonaistilavuudesta. Ilmataskut toimivat poistumisreitteinä niin vedelle kuin renkaan ja tien väliin jäävälle ilmalle, heikentäen useita rengasmelun syntyyn vaikuttavia mekanismeja kuten ilman pumppausta ja torvi-ilmiötä. Tämän lisäksi tien pinnan heijastuskyky heikenee, vähentäen ympäristöön leviävän melun määrää. Huokoisen päällysteen vaikutusta melun leviämiseen on havainnollistettu kuvassa 4.2.

Huokoinen päällyste eroaa ”tavallisista” päällysteistä pääosin siihen käytettyjen rakeitten koon puolesta. Vähentämällä päällysteessä käytetystä sorasta keskikokoisia 1 - 4 mm rakenteita, eivät isompien rakeitten väliin jäävät tilat täyty, synnyttäen edellä mainittuja ilmataskuja. Tavallisessa ”kiinteässä” päällysteessä ilmaa on noin 5 % päällysteen tilavuudesta, huokoisessa päällysteessä osuuden ollessa yli 15 %. Optimaalisessa tapauksessa päällysteen ilmataskut ovat myös yhteydessä toisiinsa, joskin käytännössä tämä toteutuu vain osittain. [7]

4.2.3 Jäykkyys ja elastisuus

Päällysteen jäykkyyden ja sidosaineen elastisuuden osuutta liikennemeluun ei ole tutkittu tarpeeksi, jotta niiden vaikutuksesta meluun voitaisiin vetää selkeitä johtopäätöksiä. Kokeissa on kuitenkin huomattu, että mitä jäykempi päällysteen pinta on, sitä meluisampi se on.[7] Jäykkiä päällysteitä tulisi näin ollen välttää.

Melun kannalta ideaalitalanteessa päällysteen jäykkyys olisi samaa tasoa renkaan kanssa. Päällysteen joustavuutta onkin tietyissä tapauksissa saatu kas-



Kuva 4.2: Huokoisen ja kiinteän päällysteen synnyttämän melun ero. Huokoinen päällyste vaimentaa kaikkia sen pinnan kautta kulkevia heijastuksia, vaimentaen tien reunalla havaittua melua. α_m on päällysteen absorptiokerroin. [7]

vatettua lisäämällä päällysteeseen silpottua kumia. Päällysteen joustavuuden kasvaessa sen kestävyys kuitenkin heikkenee, joten ongelmana on löytää kompromissi näiden kahden väliltä. [24]

4.2.4 Väri

Myös päällysteen väri vaikuttaa sen meluominaisuuksiin. Tummempi päällyste absorboi auringon valoa tehokkaammin, voidaan lämmitä jopa 10°C lämpimämmäksi kuin vastaava vaaleampi päällyste. Kuten kappaleessa 3.4.5.1 esitettiin, laskee rengasmelu noin 0,1 dB jokaista lämpöastetta kohti. Tummempi päällyste voi olla näin jopa 1 dB vaaleata hiljaisempi. [11]

Päällysteen värillä voi olla tämän lisäksi myös psykologinen vaikutus kuuli- jaan. Uusi, tumma päällyste menettää värinsä suurinpiirtein samassa tahdissa kuin sen meluominaisuudet heikkenevät. Päällysteen väri on näin helppo assosoida sen meluominaisuuksiin. Tummempi päällyste voidaan näin ollen kokea vastaavaa vaaleata päällystettä hiljaisempaan. Lisäksi vaaleat betoni- ja asfalttipäällysteet ovat perinteisesti olleet tummia asfalttipäällysteitä äänekkämpiä. Ero on sittemmin pienentynyt, mutta vaaleat päällysteet koetaan edel-

leen äänekkäämpinä. [7]

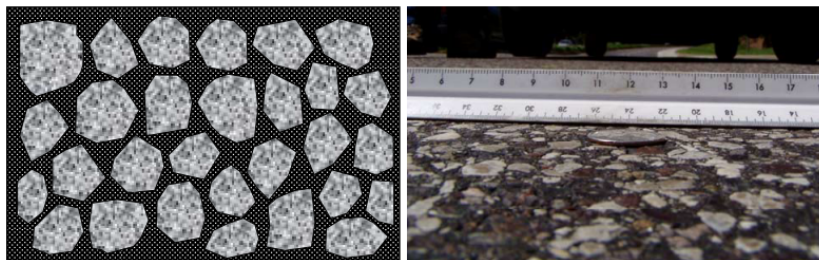
4.3 Muutamia melua vaimentavia päällystetyyppejä

Koska päällysteen ja renkaan välisestä vuorovaikutuksesta syntyvä melu on paljolti riippuvainen päällysteen pinnan tekstuurista, yleinen vaatimus melu vaimentavalle päällysteelle on tekstuurin minimoiminen ja positiivisen tekstuurin välttäminen. Näin ollen hiljaisia päällysteitä voidaan periaatteessa valmistaa mistä tahansa yleisimmistä sekoitetyypeistä.

Päällystetyypeistä puhuttaessa käytetään usein niiden lyhenteitä, joiden perässä oleva luku ilmoittaa kyseisen päällysteen suurimman raekoon. Esimerkiksi tähän työhön liittyvissä mittauksissa on käsitelty muun muassa päällysteitä SMA8 (kivimastiksiasfaltti, jonka suurin rakeen halkaisija on 8 mm) ja AB20 (asfalttibetoni, 20 mm).

4.3.1 Asfalttibetoni

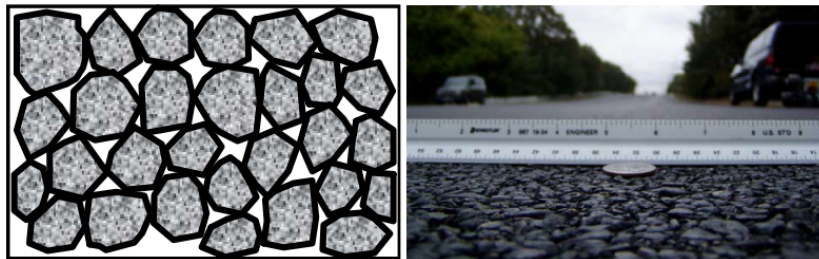
Myös perinteinen asfalttibetoni (eng. asphalt concrete), joka on tiheään suhteitettua asfaltti (eng. dense graded asphalt, DGA), voidaan saada ominaisuuksiltaan hiljaisemmaksi muokkaamalla siihen käytettyjen ainesosasten suhdetta. Pienentämällä käytetyn kiviaineksen kokoa sekä kasvattamalla sidosaineen määrää sekoitteessa ja tekemällä siitä elastisempaa, voidaan päällysteen meluominaisuuksia parantaa kestävyuden kustannuksella.



Kuva 4.3: Vasemmalla kuva asfalttibetonin rakenteesta, oikealla havainnekuva. Rakenteessa huomiotaavaa sidosaineen runsas määrä ja kiviaineksen väljyys. [24]

4.3.2 Huokoinen asfaltti

Huokoinen asfaltti (eng. porous asphalt) on avoimeksi suhteitettu asfaltti (eng. open graded asphalt, OGA), joka koostuu pääosin samankokoisista, suurikokoisista kivirakeista, joita yhdistää vähäinen kerros sidosainetta. Sidos- ja täyteaineiden vähäinen määrä johtaa korkeaan huokoisuuteen, ollen huokoisessa asfaltissa noin 18 - 25 %. [26]



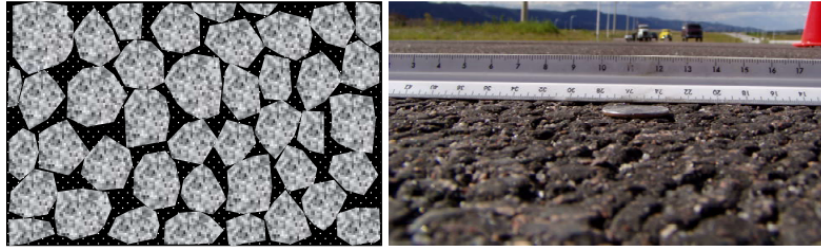
Kuva 4.4: Vasemmalla kuva huokoisen asfaltin rakenteesta, oikealla havainnekuva. Rakenteessa huomioitavaa sidosaineen vähyys sekä kiviaineksen väliin jäävä ilmatila. [24]

Vaikka runsas huokoisuus on melun kannalta positiivista, se aiheuttaa ongelmia asfaltin kestävyydelle. Päälystysvaiheessa ongelmia tuottaa sidosaineen pysyminen kiinni kiviaineksessa ja sen jälkeen päällysteen herkkyyys eroosiolle. Lisäämällä sidosaineen sekaan polymeereja ja/tai kuituja, voidaan sidosaineen valuminen minimioida ja päällysteen rakennetta lujittaa. Tästä huolimatta huokoinen asfaltti on herkkä kulumiselle ja eroosiolle, jonka takia sitä tulee välttää risteyksissä sekä muissa kovan kulutuksen tieosuuksilla. [24]

4.3.3 Kivimastiksiasfaltti

Kivimastiksiasfaltti (eng. stone mastic asphalt, SMA) on epäjatkuvasti suhteitettu asfaltti (eng. gap-graded asphalt). Se on huokoisen ja tiheän asfaltin välimuoto, joka koostuu huokoisen asfaltin tavoin pääosin suurista kivirakeista, mutta sisältää lisäksi hienojakoista kiviainesta sekä enemmän sidosainetta. Sidosaineena toimii bitumirikas kittilaasti, johon usein lisätään huokoisen asfaltin tavoin kuituja pitämään sidosaine paikallaan ja vahvistamaan rakennetta.[24]

Kivimastiksiasfaltti on lähes yhtä kestävä kuin tiheä asfalttibetoni ja reilusti kestävämpi kuin huokoinen asfaltti, ollen samalla kuitenkin keskimäärin



Kuva 4.5: Vasemmalla kuva kivimastikiasfaltin rakenteesta, oikealla havainnekuva. Rakenteessa huomioitavaa sidosaineen vähäinen määrä suhteessa kiviainekseen. [24]

3 dB(A) asfalttibetonia hiljaisempi. Päällysten ongelmat kohdistuvat tien pinnan pitoon, joka kärsii keskikokoisen kiviaineksen puutteesta. Vastapäällystetyn kivimastikiasfaltin pitokyky on hitailla nopeuksilla noin 20 % ja suuremmilla nopeuksilla jopa 30 - 40 % huonompi kuin vanhoilla ja kuluneilla päällysteillä. [26]

4.3.4 Kumi-asfaltti

Kumi-asfaltti (eng. asphalt rubber concrete, ARC) on muunnelma perinteisestä asfalttibetonista, joka saadaan lisäämällä sidosaineeseen kumirouhetta. Kumi lisää päällysten joustavuutta ja huokoisuutta, parantaen näin sen meluominaisuuksia asfalttibetoniin nähden. Lisäksi kumi hylkii tehokkaasti vettä, nopeuttaen veden poistumista tieltä ja heikentäen jään muodostumista tien pinnalle talvella.

Kumi-asfaltin kumi saadaan pääosin vanhoista auton renkaista sekä muista kierrätysmateriaaleista, vähentäen hieman kumi-asfaltin tekemisestä syntyviä jätteitä. Puoleentoista kilometriin valmista päällystettä kuluu noin 2000 käytettyä rengasta. [27]

4.4 Päällysteiden kuluminen

Päällysteiden ominaisuudet muuttuvat ajan saatossa. Päällysteeseen kohdistuu kulutusta niin liikenteestä kuin luonnonvoimista, jotka muokkaavat päällysten tekstuuria ja rakennetta. Kuluminen muuttaa samalla myös päällysten akustisia ominaisuuksia, johtaen pääsääntöisesti melun kasvamiseen.

Kuluminen aiheuttaa seuraavia muutoksia päällysteeseen:

- Mega- ja makrotekstuuri muuttuvat kivi- ja sidosaineen kuluessa pois.
- Mega- ja makrotekstuuri sekä jäykkyys muuttuvat päällysteen painautuessa kasaan.
- Mikrotekstuuri muuttuu renkaiden “kiillottaessa” tien pintaa (nastarenkaat toimivat tässä käänteisesti),
- Eroosio yhdessä maantiesuolan kanssa rapauttaa päällysteen rakennetta, johtaen hienompien ainesosien kulumiseen pois.
- Megatekstuuri muuttuu tien halkeillessa eroosiosta.
- Huokoisuus vähenee huokosten täyttyessä irtomaalla ja asfalttipölyllä.

Muutokset johtavat kaikissa bitumipohjaisissa päällysteissä, kuten DAC ja SMA, keskimäärin noin 1 - 2 dB melutason nousuun ensimmäisten kahden vuoden kuluessa, painottuen pääosin ilman siirtymään liittyville taajuuksalueille. Tämän jälkeen muutos kuitenkin hidastuu, pysyen lähes vakaana tien käyttöajan loppuun asti [7]. Hiljaisille päällysteille meluominaisuuksien muutokset ovat hieman suurempia, johtaen keskimäärin 4,5 dB(A) melutason kasvuun 10 vuoden aikana [28].

Luku 5

Mittausjärjestelyt

5.1 Tilastollinen ohiajomittausmenetelmä (SPB)

Sovellettu ohiajomittausmenetelmä on eurooppalaisen standardin EN ISO 11819-1:2001 mukainen menetelmä vertailla liikennemelua eri päällystetyypeillä liikenteen koostumuksen vaihdellessa. Menetelmässä yksittäisistä ajoneuvoista mitataan niiden synnyttämän äänen fast-aikapainoitettu ja A - taajuuspainotettu hetkellinen maksimitaso, $L_{A_{fmax}}$, yhdessä ajoneuvon nopeuden kanssa. Jokainen mitattu ajoneuvo luokitellaan kokonsa puolesta ajoneuvoluokkaan: henkilöautot, kaksiakseliset raskaat ajoneuvot ja moniakseliset raskaat ajoneuvot. Lisäksi itse mittauksen kohteena oleva tie luokitellaan nopeutensa puolesta yhteen kolmesta tienopeusluokkaan: "matala" (45-64 km/h), "keski" (65-99 km/h) ja "korkea" (>100 km/h). [23]

Näiden tietojen perusteella tien melulle voidaan laskea tilastollinen ohiajoindeksi SPBI:

$$SPBI = 10 \lg \left[W_1 10^{\frac{L_1}{10}} + W_{2a} \left(\frac{v_1}{v_{2a}} \right) 10^{\frac{L_{2a}}{10}} + W_{2b} \left(\frac{v_1}{v_{2b}} \right) 10^{\frac{L_{2b}}{10}} \right] \quad (5.1)$$

missä L_1, L_{2a}, L_{2b} ovat äänenpainetasot eri ajoneuvoluokille,
 W_1, W_{2a}, W_{2b} ovat painotuskertoimet jotka ovat vastaavia kuin ajoneuvoluokkien oletetut suhteet kokonaisliikenteestä,
ja v_1, v_{2a}, v_{2b} ovat referenssinopeudet kullekin ajoneuvoluokalle.

Referenssinopeudet sekä painotuskertoimet eri ajoneuvoluokille on esitetty taulukossa 5.1.

Standardi asettaa tietyt vaatimukset myös mittauspaikan sijainnille ja sen ympäristölle. Ohiajot mitataan tien sivusta 10 m etäisyydellä tien keskivii-

Taulukko 5.1: Vertailunopeudet ja painotekijät(W_x) eri tienopeusluokissa [23]

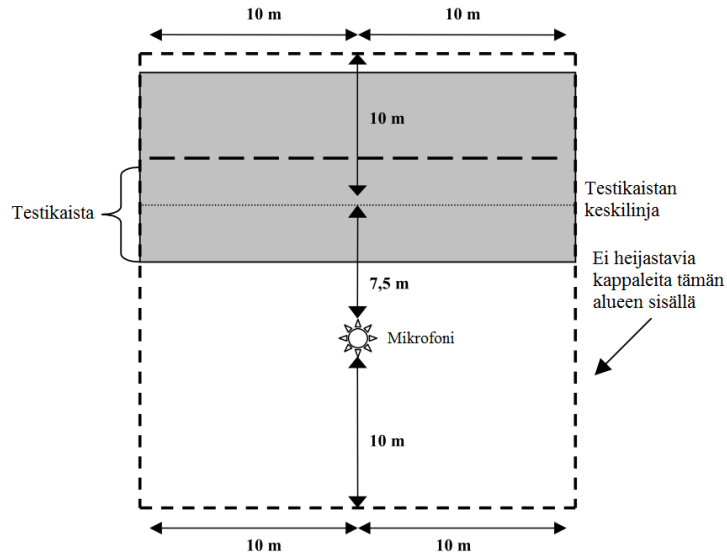
Ajoneuvoluokka		Tienopeusluokka					
		Matala		Keski		Korkea	
Nimi	Nro.	Vert. nopeus [km/h]	W_x	Vert. nopeus [km/h]	W_x	Vert. nopeus [km/h]	W_x
Henkilöautot	1	50	0,900	80	0,800	110	0,700
Kaksiakseliset raskaat ajoneuvot	2a	50	0,075	70	0,100	85	0,075
Moniakseliset ras- kaat ajoneuvot	2b	50	0,025	70	0,100	85	0,225

vasta 1,2 m tien pinnan korkeudesta. Mitattavan päällysteen tulee olla yhtenäinen vähintään 30 m mittauspaikasta molempiin suuntiin ja tien erittäin tasainen ja suora. 10 m säteellä mittauspaikan ympärillä ei saa olla yhtään heijastavia pintoja kuten rakennuksia, kaiteita tai muita suuria massoja. Lisäksi maasto mikrofoniin ja mitattavan tieosuuden välissä pitää olla vapaa esteistä ja samassa tasossa kuin tien pinta. Samat vaatimukset on esitetty tarkemmin myös kuvissa 5.1 ja 5.2. Satunnaisten virheiden välttämiseksi ja tulosten tarkkuuden maksimoimiseksi, jokaisesta ajoneuvoluokasta tulee mitata tietty minimimäärä ohiajoja:

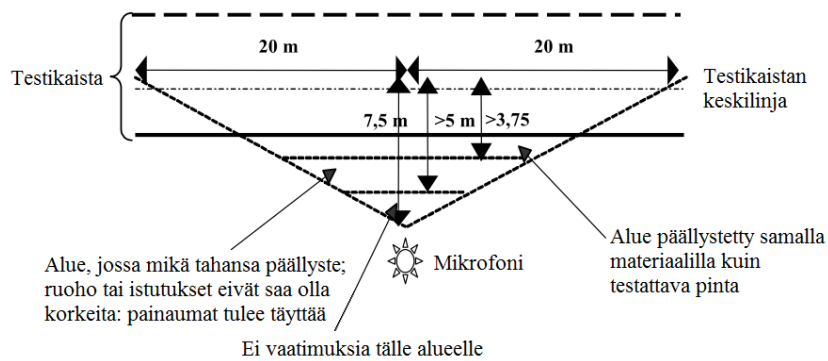
- henkilöautot min. 100
- kaksiakseliset raskaat min. 30
- moniakseliset raskaat min. 30
- kaksi- ja moniakseliset yhdessä min. 80

Mitattujen ajoneuvojen tulee olla selkeästi erotettavissa taustamelusta tai muista ohiajoista. Vaatimuksena on, että juuri ennen ja juuri jälkeen mitattavaksi aiotun ajoneuvon ohitusta pitää A-painotetun äänenpainetaso olla vähintään 6 dB alle ohituksessa mitatun maksimin. Mittausten aikana tuulen nopeus mittarin korkeudella ei saa ylittää 5 m/s ja ilman lämpötilan pitää olla välillä 5-30 °C. [23]

Tässä työssä on käytetty SPB-menetelmästä hieman sovellettua muotoa. Mittauksiin on lisätty yksi mittari mittaamaan tiemelun kaukokenttää. Tämän tarkoituksena on tutkia mittaustulosten vertautuvuutta laskentamallin antamaan tulokseen ja pyrkiä saamaan kattavampi kuva mittauskohteessa ilmenevästä meluhaitasta. Kaukokentän mittari sijoitettiin ensimmäisen mittarin taakse, 25 m päähän tien keskiviivasta.



Kuva 5.1: Vaatimukset mittauspaikalle heijastavien tai suojaavien pintojen suhteen [11].



Kuva 5.2: Vaatimukset mitattavan kaistan ja mikrofoniin väliselle alueelle [11].

Lisäksi menetelmän vähittäisvaatimuksista on jouduttu tinkimään. Koska useimmissa kohteissa ei raskaista ajoneuvoista saada mitattua realistisella aikataululla menetelmän vaatimaa minimiäärää, SPBI:n laskemisessa on jouduttu tinkimään. Tuloksissa vertaillaan mitattavien kohteiden keskiäänitasoja L_{Aeq} , jotka ovat sekä vertailukelpoisempia muiden melumittausten kanssa että mittausteknisesti luotettavampia kuin SPB-menetelmässä käytetty enimmäisäänitaso L_{AFmax} . Tuloksissa esitetyt arvot eivät näin ollen ole täysin vertailukelpoisia muiden alan julkaisujen kanssa. Tulokset ovat kuitenkin

vertailukelpoisia tilanteissa, joissa huomioon on otettu vain henkilöautoliikenne.

5.1.1 Laskentamalli

Kohteiden laskennallinen tarkastelu suoritettiin CadnA 4.4 laskentaohjelmistolla. Laskennassa käytettiin pohjoismaista tieliikennemelun laskentamallia (Nordic Council of Ministers 1996), joka ottaa huomioon maaston ja rakenteiden muodostamien esteiden vaikutukset äänen etenemiseen sekä maanpinnan ja ilman absorptioon aiheuttamat vaimennukset.

Laskentamallin pohjana käytettiin Helsingin kaupungin meluselvityksen 2013 maastomallia sekä Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) toimittamaa SeutuCD'12 aineistoa. Helsingin kaupungin maastomalli sisälsi tiedot maastonmuodoista, rakennuksista sekä liikenneväylistä, SeutuCD'12:n sisältäessä tiedot rakennusten asukasmääristä.

Melutasoja on laskettu 2,5 metrin välein sijoitettuihin laskentapisteisiin kahden metrin korkeudelle maan pinnan tasosta ja tulokset on esitetty keskiäänivyöhykkeinä 5 dB luokissa. Laskennoissa otettiin huomioon ensimmäisen kertaluokan heijastukset. Rakennusten ulkoseinien absorptiosuhteena on käytetty arvoa 0,2.

Tieliikennemelun laskentamallin tulokset ja mittaustulokset ovat hyvin vertailukelpoisia silloin, kun maasto on tasainen ja sääolosuhteet vastaavat mallissa asetettuja sääolosuhdevaatimuksia. Tällöin tulokset eroavat ± 1 dB toisistaan. Mitä monimutkaisempi maasto on, sitä enemmän lasketut ja mitatut tulokset eroavat toisistaan. Laskentamallivertailussa tieliikenteen aiheuttamalle melulle mitatut ja lasketut tasot mäkisessä maastossa erosivat suurimmillaan 5 - 6 dB (Eurasto 2005). Tässä työssä tarkasteltuja alueita voidaan pitää suhteellisen yksinkertaisina laskentaympäristöinä, minkä vuoksi arvioimme, että laskentamallin tarkkuus tiemelun osalta on tässä tapauksessa luokkaa ± 2 dB.

5.2 Tulosten normalisointi

Tulosten vertailukelpoisuuden parantamiseksi tulosten käsittelyssä on otettu huomioon tekijät, jotka aiheuttavat systemaattista vaikutusta mitattuihin melutasoihin. Näitä ovat mittausten aikainen taustamelu, lämpötila sekä mitattujen ajoneuvojen nopeus.

5.2.1 Taustamelun korjaus

Taustamelun vaikutus mittaustuloksiin on pyritty minimoimaan jo mittausstandardissa, joka asettaa vähimmäisvaatimuksen ohiajon aikaiseen keskiäänitason ja taustamelun väliselle suhteelle. Tarkkuuden lisäämiseksi saatujen tuloksien käsittelyssä on kuitenkin otettu huomioon myös taustamelun korjaus.

Taustamelukorjauksessa käytetään taustamelun aikaista keskiäänitasoa. Taustamelulla tarkoitetaan mittausten niitä jaksoja, jolloin mittareiden kohdalla tai niiden välittömässä läheisyydessä ole havaittavissa tieliikennettä. Saatu taustamelun arvo on vähennetty tuloksista kaavan 5.2 [7] mukaisesti.

$$L = 10 \log(10^{L_M/10} - 10^{L_N/10}) \quad (5.2)$$

missä L on korjattu taso [dB],
 L_M on mitattu taso [dB],
 ja L_N on taustamelun taso [dB].

Taustamelun vaikutus tuloksiin on varsin vähäinen, ollen työn mittausten kohdalla 0,1 dB tai vähemmän.

5.2.2 Lämpötilakorjaus

EU:n rengasmeludirektiivissä (2001/43/EC) on A-painotettujen tulosten lämpötilakorjaukselle annettu seuraava kaava:

$$L_R(\theta_{ref}) = L_R(\theta) + K(\theta_{ref} - \theta) \quad (5.3)$$

missä L_R on korjattu taso [dB],
 θ on mitattu tienpinnan lämpötila,
 θ_{ref} on referenssilämpötila (20 °C),
 ja K on lämpötilakerroin [dB/°C].

Lämpötilakerroin K on henkilöautoille -0,03 dB/°C kun $\theta > \theta_{ref}$ ja -0,06 dB/°C kun $\theta < \theta_{ref}$. Kevyille kuorma-autoille kerroin on -0,02 dB/°C ja raskaille 0.

Vaikka kaavassa 5.3 lasketaan lämpötilakorjaus tien pinnan lämpötilan mukaan, voidaan samaa kaavaa käyttää myös ilman lämpötilan mukaan laskettaessa. Periaate lämpötilan vaikutukselle mittatuloksiin on sama, ainoastaan käytetty lämpötilakerroin muuttuu. Esimerkiksi lähteessä [22] on ilman lämpötilakertoimeksi esitetty arvoa -0,027 dB/°C, jolloin lämpötilan vaikutus

oletetaan täysin lineaariseksi lämpötilasta riippumatta. Näin ollen kaavan 5.3 yhteydessä annettuja kertoimia pidetään tarkempina.

Tässä työssä samalla paikalla tehtyjen mittausten ajallinen ero venyi pitkäksi, jolloin erillisten mittausten lämpötilojen välillä on suurimmillaan jopa 20 °C ero. Normalisointi 20 °C lämpötilaan aiheutti tuloksiin keskimäärin 0,5 dB(A):n muutoksen.

5.2.3 Nopeuskorjaus

Työn mittausten kohteena olleista viidestä tiestä neljässä vallitsevana nopeusrajoituksena oli 40 km/h, Malminkartanonttiellä rajoituksen ollessa 50 km/h. Keskinopeus teiden välillä vaihteli kuitenkin niin paljon, että tulosten normalisointi nopeuden suhteen on tarpeen kaikkien mittausten kohdalla.

$$L_{corr} = L_{meas} - 35 \log_{10}(V_{meas}/V_{nom}) \quad (5.4)$$

missä L_{corr} on korjattu taso [dB],
 L_{meas} on mitattu taso [dB],
 V_{meas} on mitattu ajoneuvon nopeus,
 ja V_{nom} on nimellinen nopeus (40 km/h).

Tulokset normalisoitiin nopeuteen 40 km/h kaavan 5.4 [7] mukaisesti. Mitattuna ajoneuvon nopeutena käytettiin mittauspisteen ohittaneiden ajoneuvojen nopeuden keskiarvoa. Nopeuden vaikutus tuloksiin vaihteli 0,3 - 4,0 dB:n välillä.

5.3 Mittauslaitteisto

Mittaukset suoritettiin käyttäen Norsonic 131 ja 140-äänitasomittareita (kuva 5.3), jotka täyttävät SFS 2877 / IEC651 ja IEC 804 vaatimukset tarkkuusluokan 1 mittareille. Norsonic 131-mittarilla mitattiin 25 m etäisyydellä ohiajojen A-painotettu keskiäänitaso L_{Aeq} sekä enimmäisäänitaso L_{AFmax} . Norsonic 140-mittarilla mitattiin 10 m etäisyydeltä äänitasot lisäksi terssikaistoittain. Mittaukset suoritettiin yhden sekunnin mittausresoluutiolla. Mittarit kalibroitiin jokaisen mittauksen alussa ulkoisella äänitasokalibraattorilla mittaustarkkuuden varmistamiseksi. Mittarit olivat asennettuna telineisiin 1,2 m korkeuteen.

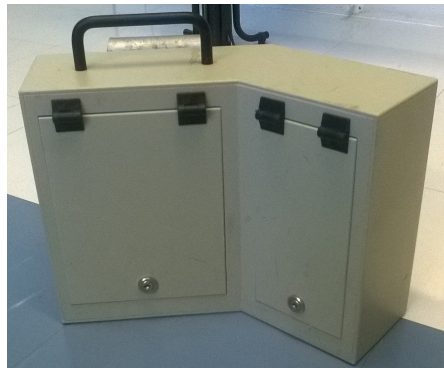
Ohiajojen lukumäärä ja nopeudet mitattiin Viacount II liikennelaskurilla (kuva 5.4). Laskurilla saatiin ohiajoista mitattua tapahtumahetki, ajoneu-

von nopeus sekä ajoneuvon pituus. Tämän työn mittauksissa laskuri oli samalla kohdalla kuin äänitasomittarit. Mittari oli asennettuna lyhtypylväaseen tai muuhun vastaavan tien läheisyydessä olevaan rakenteeseen, noin 1 m korkeuteen.

Sään mittaaminen suoritettiin Kestrel 4500 sääasemalla (kuva 5.5), jolla saatiin mitattua ilman lämpötila sekä tuulen suunta ja nopeus. Mittausten aikana sääasema oli sijoitettuna joko äänitasomittareiden yhteyteen tai kahden mittauspisteen välille. Sääasema oli asennettuna telineeseen 1,7 m korkeuteen.



Kuva 5.3: Mittauksissa käytetyt äänitasomittarit. Vasemmalla Norsonic 140 ja oikealla Norsonic 131.



Kuva 5.4: Mittauksissa käytetty liikennelaskuri Viacount II



Kuva 5.5: Mittauksissa käytetty sääasema Kestrel 4500

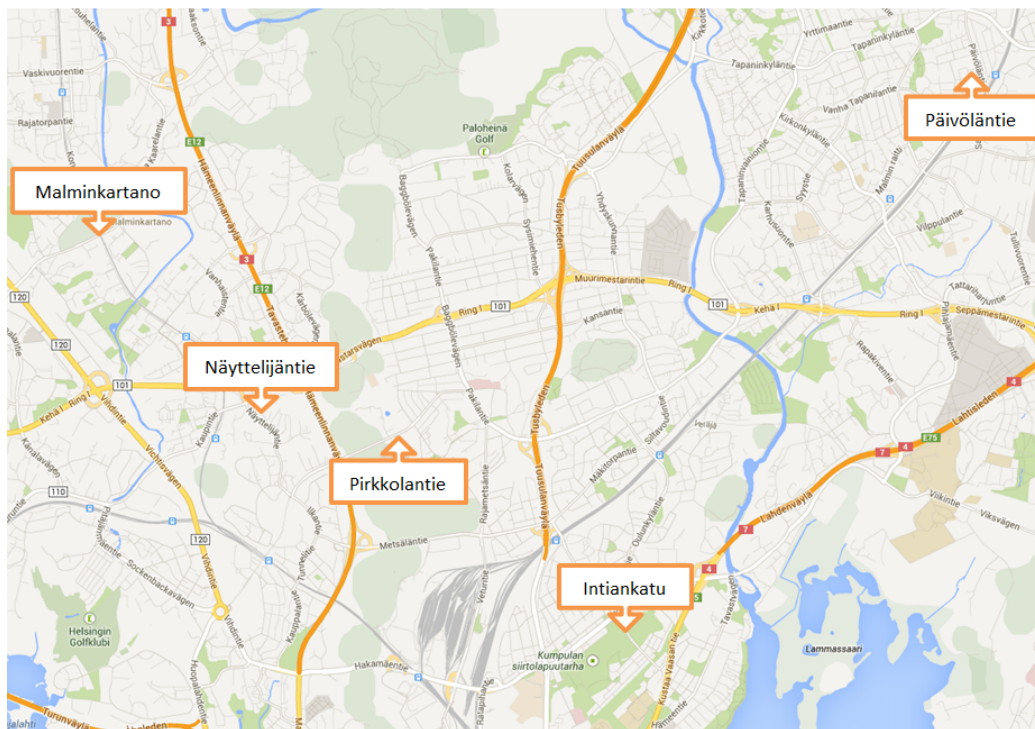
Mittauksista saatu materiaali käsiteltiin Norsonic NorReview 3.1 ohjelmistolla, jossa datasta saatiin laskettua halutut tunnusluvut. Liikennelaskurin data käsiteltiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

5.4 Mittauskohteet

Mittauksia suoritettiin kesän 2013 aikana viidessä kohteessa eri puolilla Helsinkiä. Näistä viidestä kohteesta neljä, Näyttelijäntie, Malmikartanontie, Pirkkolantie ja Päivöläntie, olivat kohteita jotka päällystettiin kivimastikiasfaltilla. Yksi kohde, eli Intiankatu oli vertailukohde, joka päällystettiin tavallisel-

la asfalttibetonilla. Jokaisessa kohteessa tehtiin mittaukset ennen ja jälkeen päällystyksen.

Kohteet valittiin Helsingin kaupungin rakennusviraston listauksesta, jonka valinnat perustuivat Helsingin kaupungin meluntorjunnan toimintasuunnitelmassa määriteltyihin tieosuuksiin. Valintakriteereinä käytettiin SPB-menetelmän vaatimuksia mittauspaikalle. Ottaen huomioon kaupunkiympäristön monimuotoisuuden ei yksikään mittauskohteista täyttänyt kokonaan menetelmän asettamia vaatimuksia. Kohteista saatuja tuloksia voidaan kuitenkin pitää tässä yhteydessä tarpeeksi tarkkoina. Mittauspaikkoja on lisäksi esitelty liit-



Kuva 5.6: Mittauskohteiden sijainnit

teessä A, jossa on tarkkojen mittauspaikkojen lisäksi kuvia kohteista ja niiden ympäristöstä.

5.4.1 Näyttelijäntie

Näyttelijäntie sijaitsee Pohjois-Haagassa Kehä I:n läheisyydessä. Tien ympärillä oleva rakennuskanta on lähes kokonaan kerrostaloja, jotka sijaitsevat

noin 20 - 100 m päässä tiestä vaihtelevalla etäisyydellä toisistaan. Rakennusten asettelulla tiehen nähden ei ole yhtenäistä linjaa, osan taloista ollessa tien suuntaisesti ja osan ollessa poikittain. Molemmiin puolin tietä oleva maasto lähtee loivaan nousuun poispäin tiestä, muodostaen kourun jonka keskellä tie kulkee. Ympäröivä maasto on lähes kokonaan rakennusten piha-aluetta.

Tien nopeusrajoitus on 40 km/h, mutta mittausten perusteella keskinopeus on 42 km/h. Raskaan liikenteen osuus kokonaisliikenteestä on HRK:n tietojen mukaan 8%, mutta mittausten aikana osuus oli noin 6%. Tie on viimeksi päällystetty vuonna 2004 AB 20 päällysteellä ja uusi päällyste on tyyppiä SMA8.

Alueen läpi kulkee useampi bussilinja ja mittauspaikkojen läheisyydessä oli neljä bussipysäkkiä, kaksi molempiin suuntiin. Lisäksi kohteen läheisyys Kehä I:n kanssa tuo Näyttelijäntielle paljon läpiajoliikennettä, nostaten tien kokonaisliikennemäärää ja näin myös alueella vallitsevaa kokonaismelutasoa. Ohiajomittauksissa näiden vaikutus tuloksiin on saatu kuitenkin karsittua.

5.4.2 Malminkartanontie

Malminkartanontie sijaitsee Malminkartanossa. Alueella sijaitseva asutus muodostuu suurimmaksi osaksi kerrostaloista, ja mitattavan tieosuuden yhteydessä rakennukset ovat pääosin tien varrella tien suuntaisesti. Tien eteläpuolella olevat rakennukset ovat kerrostaloja ja sijaitsevat lähimmillään noin 15 - 70 m päässä tiestä. Pohjoispuolella sijaitsee muutamia rivitaloja noin 30 - 100 m etäisyydellä, alueen ollessa suurimmalta osin metsää. Maasto tien varrella on erittäin vaihtelevaa, aiheuttaen huomattavia vaihteluita melun käyttäytymisessä alueella.

Tien nopeusrajoitus on 50 km/h, keskinopeuden mittauspisteellä ollessa 52 km/h. Raskaan liikenteen osuus kokonaisliikennemäärästä oli mittausten aikana noin 4%. Tien edellinen päällyste, AB 22, on vuodelta 2002 ja uutena päällysteenä on SMA 11.

5.4.3 Pirkkolantie

Pirkkolantie sijaitsee Pirkkolan ja Maunulan välissä. Tieosuuden nopeusrajoitus on 50 km/h ja mittausten aikaisen liikenteen keskinopeus oli 52 km/h. Raskaan liikenteen osuus kokonaisliikennemäärästä mittausten aikana oli 10%. Tien edellinen päällyste, SMA 6, on vuodelta 2006 ja uusi päällyste on tyyppiä SMA 11.

Alueen rakennuskanta muodostuu pääosin yksikerroksisista rivi- ja omakotitaloista, jotka sijaitsevat varsin tiiviisti tien pohjoispuolella noin 20 m päässä ja eteläpuolella noin 50 m päässä tiestä. Rakennusten piha-alueet jatkuvat lähes kaikissa kohteissa tien ja rakennusten välille, jolloin alue on varsin herkkä melulle. Alueella ei rakennusten lisäksi ole muita heijastavia rakenteita tai suuria maaston vaihteluja, tehden kohteesta varsin suotuisan mittauksille.

5.4.4 Päivöläntie

Päivöläntien ympäristössä sijaitseva asutus on pääosin omakoti- ja paritaloja sekä matalia kerrostaloja. Alueen talot ovat lähes yksinomaan tien suuntaisesti, piha-alueiden sijoituessa vaihtelevasti rakennusten ympärille. Rakennukset sijaitsevat tien välittömässä läheisyydessä, tehden sopivien mittauspaikkojen löytämisen haastavaksi. Työn yhteydessä käytetyissä mittapaikoissa ilmeni hieman heijastuksia mittapaikan viereisistä rakennuksista, mutta saatuja tuloksia voidaan silti pitää vertailukelpoisina.

Päivöläntien nopeusrajoitus on 40 km/h, mittausten aikaisen liikenteen keskinopeuden ollessa 41 km/h. Raskaan liikenteen osuus kokonaisliikennemäärästä oli mittausten aikana 4%. Tie on päällystetty edellisen kerran vuonna 2003 päällystetyypillä AB 22. Uutena päällysteenä tielle tuli SMA 11.

5.4.5 Intiankatu

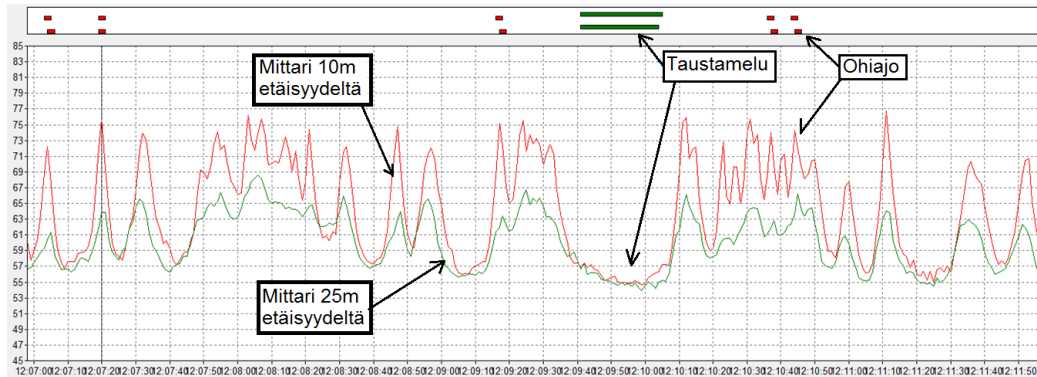
Intiankadun ympäristö on varsin avaraa ja vaihtelevaa. Asutusta tien varrella on ainoastaan tien eteläisessä päässä, pohjoisen pään ollessa puistoa ja metsää. Rakennuskanta alueella on varsin tiivistä ja lähellä tietä, joten mitaukset suoritettiin puiston läheisyydessä, jossa rakennuksia ei ollut lainkaan.

Intiankadulla on nopeusrajoitus 40 km/h, mittausten aikaisen liikenteen keskinopeuden ollessa 44 km/h. Raskaan liikenteen osuus kokonaisliikenteestä oli mittausten aikana 13%. Tien edellinen päällyste, AB 22, on noin vuodelta 2003 ja tielle tehty uusi päällyste on tyyppiä AB 20.

Luku 6

Tulokset

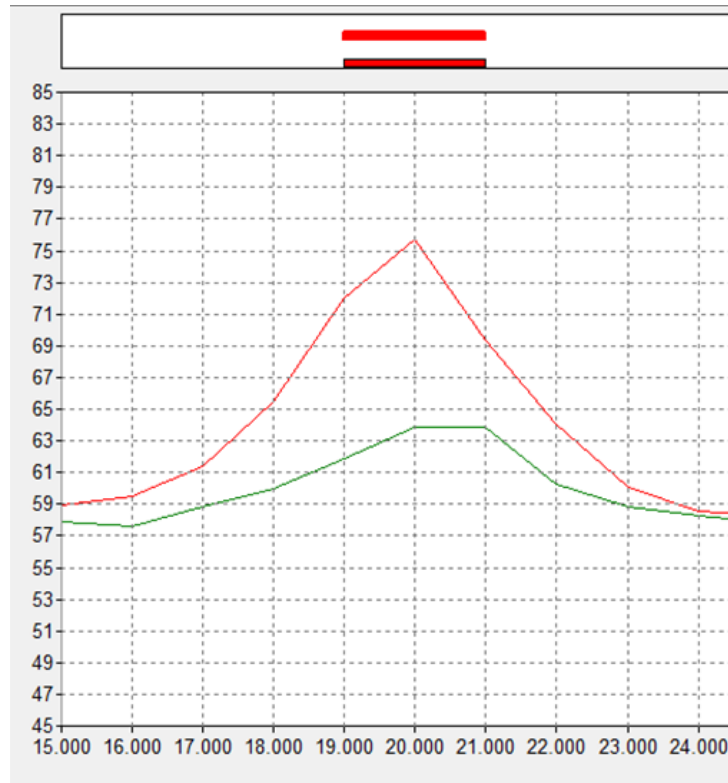
Mittauksista saatuja tuloksia käsiteltiin NorReview 3.1 ohjelmistossa yhdessä liikennelaskurin liikennetietojen kanssa. Mittareista saatua raakadataa on havainnollistettu kuvassa 6.1, jossa punaisella viivalla on esitetty keskiäänitasot 10 m etäisyydellä ja vihreällä viivalla 25 m etäisyydellä tien keski-
viivasta. Datasta on tämän jälkeen valittu ne ohiajot, jotka täyttävät SPB-menetelmän asettamat ehdot vertailukelpoisille ohiajoille, sekä ne hetket jolloin ohiajoja ei ole taustamelun määrittämiseksi. Kuvan yläreunassa sijaitsevat punaiset palkit merkitsevät valittuja ohiajoja, vihreän palkin merkitessä taustamelua.



Kuva 6.1: Mittauksista saatua dataa NorReview 3.1 ohjelmistossa. Punaisella käyrällä on merkitty 10 m etäisyydellä tiestä olleen mittarin L_{Aeq} -arvoja, vihreän kuvatessa 25 m etäisyydellä ollutta mittaria.

Yksittäisen ohiajon tuottamaa dataa on havainnollistettu kuvassa 6.2, jossa on rajattu yhden ohiajon tuottama keskiäänitaso ajan muuttujana. Kuten

kuvasta huomataan, ohiajo kestää kokonaisuudessaan yhteensä 6 - 8 sekuntia, mutta tuloksiin siitä otetaan käsiteltäväksi ainoastaan kahden sekunnin mittainen jakso huippuarvon ympäristöstä. Kuten kuvassa 6.1, on valittua jaksoa merkitty punaisilla palkeilla kuvaajan yläreunassa.



Kuva 6.2: Yksittäisen ohiajon tuottama data. Punaisella käyrällä on merkitty 10 m etäisyydellä tiestä olleen mittarin L_{Aeq} -arvoja, vihreän kuvatessa 25 m etäisyydellä ollutta mittaria. Koko ohiajoa ei ole otettu tarkasteluun, vaan ohiajosta on rajattu kahden sekunnin mittainen jakso huippuarvon ympäriltä.

6.1 Mittaustulokset

6.1.1 Mittausten aikaiset olosuhteet

Melumittaukset suoritettiin touko- ja marraskuun välisenä aikana vuonna 2013. Mittaukset kestivät kussakin kohteessa 2 - 3 tuntia ja ne suoritettiin

pääosin kello 9 - 17 välisenä ajankohtana. Mittauksissa mitattiin sekunnin jaksojen keskiäänitasot 10 m ja 25 m etäisyydellä tiestä, tapahtuneiden ohiajojen ajankohdat, ohiajaneiden ajoneuvojen nopeus ja koko sekä mittauksen aikana vallineet sääolosuhteet. Taulukossa 6.1 on esitetty eri mittauspaikoilla vallinneita mittausolosuhteita. Olosuhteiden vaikutusta mittautuloksiin on tarkasteltu osiossa 6.1.4.

Taulukko 6.1: Mittausten aikaiset olosuhteet.

Mitattu katu ja päälystetyyppi	Aika	Taustamelu [dB(A)]	Lämpötila [°C]	Tuulen nopeus [m/s]
Päivöläntie (AB22)	3.6. 14:20 - 16:50	53,4	26,6	0,6
Päivöläntie (SMA11)	2.10. 11:50 - 15:30	47,0	8,8	0,4
Näyttelijäntie (SMA8)	28.5. 12:20 - 15:15	47,0	26,6	3,3
Näyttelijäntie (AB20)	3.6. 9:40 - 12:50	55,8	24,3	0,6
Malminkartanontie (AB22)	9.7. 13:30 - 16:20	52,4	24	0,5
Malminkartanontie (SMA11)	12.9. 10:45 - 13:50	48,9	19,3	0,7
Intiankatu (AB22)	26.6. 9:30 - 12:15	48,0	25,1	0,5
Intiankatu (AB20)	11.11. 10:45 - 13:30	47,2	4,2	0,3
Pirkkolantie (SMA6)	11.11. 14:15 - 16:20	57,1	2,4	0,4
Pirkkolantie (SMA11)	18.11. 11:00 - 13:55	55,3	5,7	1,9

6.1.2 Mittausten aikainen liikenne

Mittausten aikaista liikennettä mitattiin Viacount II liikennelaskurilla. Näiden mittausten perusteella on saatu poikkileikkaus kunkin tieosuuden liikenteen rakenteesta mittausten ajalta. Saatuja liikennetietoja on käytetty niin tulosten normalisointiin (osio 6.1.4) kuin laskentamallien lähtötietoina. Koska liikennettä on seurattu kussakin kohteessa vain noin kolmen tunnin ajalta, ei

saadut tiedot anna täydellistä kuvaa kohteen keskimääräisestä vuorokausiliikenteestä. Mitattuja liikennetietoja ja erityisesti niillä saatuja laskentamallin tuloksia voidaan kuitenkin verrata mittaamalla saatuihin keskiäänitasoihin, jolloin saadaan suuntaa antava kuva melun leviämisestä kohteiden ympäristössä.

Mitatut liikennetiedot on esitetty oheisessa taulukossa 6.2.

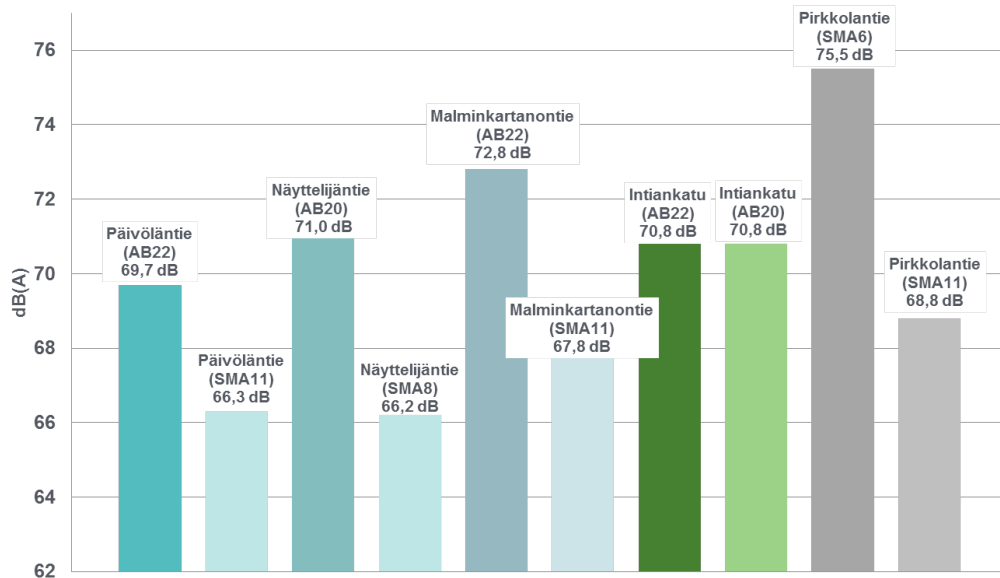
Taulukko 6.2: Mittausten aikaiset liikennetiedot.

Mitattu katu ja päällystetyyppi	Aika	Ohiajojen lkm	Keskinopeus [km/h]	Raskas liikenne [%]
Päivöläntie (AB22)	3.6. 14:20 - 16:50	999	39	4,8
Päivöläntie (SMA11)	2.10. 11:50 - 15:30	1081	38	6,1
Näyttelijäntie (AB20)	28.5. 9:40 - 12:50	1849	42	7,5
Näyttelijäntie (SMA8)	3.9. 12:20 - 15:15	1854	41	6,5
Malminkartanontie (AB22)	9.7. 13:30 - 16:20	1654	50	5,5
Malminkartanontie (SMA11)	12.9. 10:45 - 13:50	2074	45	2,9
Intiankatu (AB22)	26.6. 9:30 - 12:15	992	41	12,6
Intiankatu (AB20)	11.11. 10:45 - 13:30	836	42	12,8
Pirkkolantie (SMA6)	11.11. 14:15 - 16:20	1174	53	11,8
Pirkkolantie (SMA11)	18.11. 11:00 - 13:55	1117	41	8,9

6.1.3 Rengasmelumittaukset

Mittausten pohjalta valittiin kustakin kohteesta 100 henkilöauton ohiajoa, joista laskettiin kohteen ohiajojen keskiäänitasot 10 m etäisyydellä tien keskilinjasta. Uudet päällysteet olivat mittausten aikana noin 2 - 3 viikkoa vanhoja, vanhojen päällysteiden iät on käyty läpi mittauskohteiden esittelyssä

osiossa 5.4. Saadut tulokset on esitetty tie- ja päällystekohtaisesti kuvassa 6.3.



Kuva 6.3: Mitatut ohiajojen keskiäänitasot 10 m etäisyydellä tien keskivii-vasta. Tulokset laskettu 100 henkilöauton ohiajon keskiarvona.

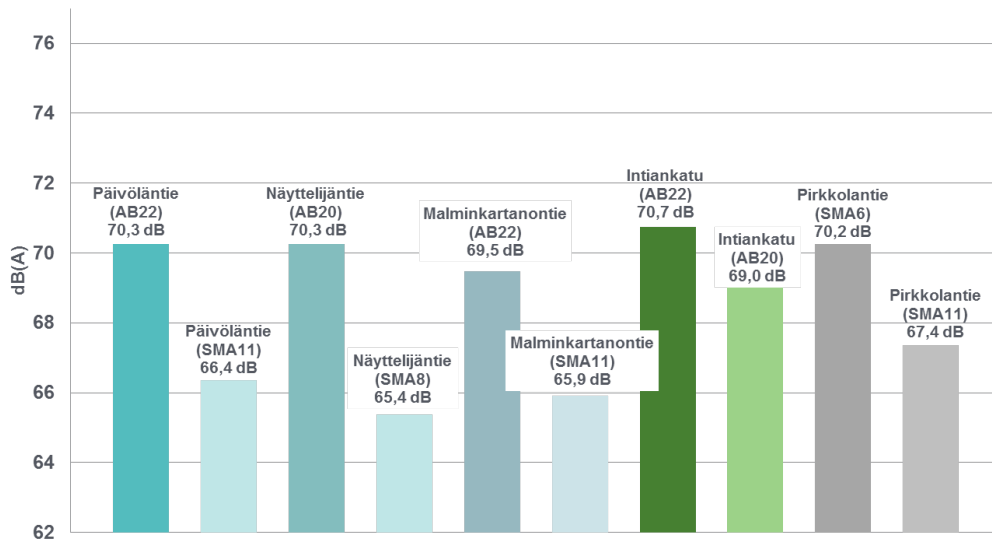
Tulosten perusteella voidaan todeta ohiajojen melutasojen laskeneen vanhaan päällysteeseen verrattuna kaikissa niissä mittauksissa, joissa uutena päällysteenä mitattavana on ollut tuore SMA -päällyste. Intiankadulla, joka päällystettiin uudestaan AB:lla, ohiajojen melutaso pysyi samana kuin vanhalla päällysteellä.

Tuloksissa korostuu erityisesti Malminkartanon ja Pirkkolantien vanhojen päällysteiden melutasot, jotka ovat suhteellisen korkeat verrattuna muihin mittauksiin. Tämä viittaa ohiajojen melutasojen nopeusriippuvuuteen, keskinopeuden oltua kyseisillä tieosuuksilla muita kohteita suurempi.

6.1.4 Tulosten normalisointi

Jotta tulokset olisivat vertailukelpoisempia keskenään, ne täytyy normalisoida osiossa 5.2 esitettyjen kaavojen mukaisesti lämpötilan, taustamelun ja nopeuden suhteen. Taustamelukorjaus laski tuloksia alle 0,25 dB, ja sen vaikutus tuloksiin oli kolmesta muuttujasta vähäisin. Lämpötilan normalisointi

korjasi tuloksia 0,1 - 1,0 dB, riippuen vallinneesta lämpötilasta. Tärkein tekijä, eli nopeuden suhteen normalisointi, korjasi tuloksia 0,4 - 4,0 dB. Taustamelun, lämpötilan ja keskinopeuden mukaan normalisoidut ohiajojen keskiäänitasot on esitetty kuvassa 6.4.



Kuva 6.4: Mitatut ohiajojen keskiäänitasot 10 m etäisyydellä tien keskiviihasta normalisoituna taustamelun, lämpötilan ja keskinopeuden mukaisesti. Tulokset laskettu 100 henkilöauton ohiajon keskiarvona.

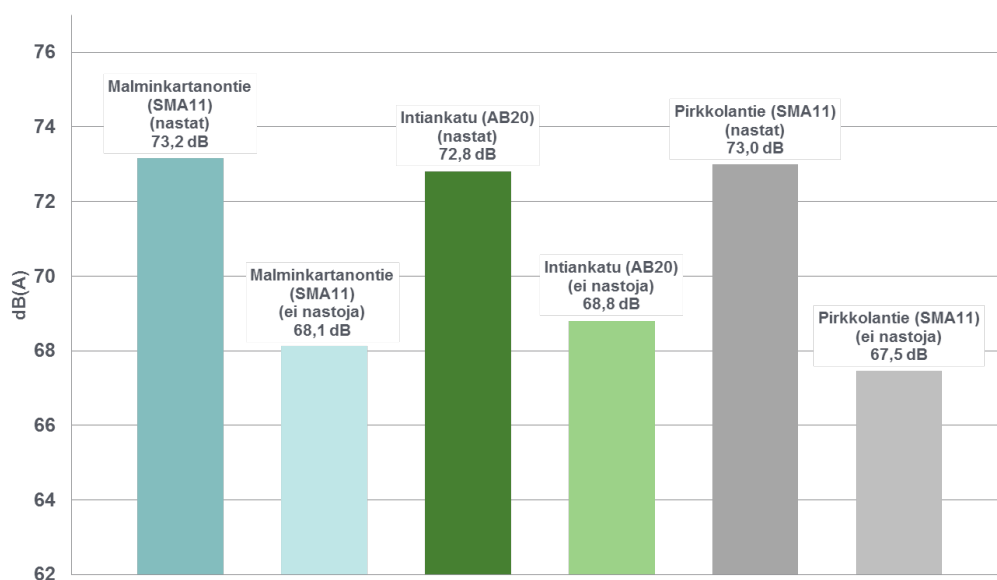
Normalisoinnin seurauksena erot ohiajojen keskiäänitasoissa tasoittuvat eri tieosuuksien välillä. Keskiäänitaso vanhalla päällysteellä on noin 70 dB jokaisella tieosuudella, riippumatta vanhan päällysteen tyypistä. Uudella SMA-päällysteellä ohiajon keskiäänitaso on noin 66 dB, vaihdellen hieman eri tieosuuksilla, ja uudella AB-päällysteellä noin 69 dB. Uusi SMA-päällyste laskee ohiajojen keskiäänitasoa näin ollen noin 4 dB verrattuna vanhaan päällysteeseen ja uusi AB-päällyste noin 2 dB.

6.1.5 Nastarenkaiden vaikutus keskiäänitasoihin

Mittausten aikataulun myöhästyttyä loka- ja marraskuulle, alkoi nastarenkaiden käyttö häiritä mittauksia. Tämä oli havaittavissa erityisesti Intiankadun (11.11.) ja Pirkkolantien (18.11.) mittauksissa, joissa paikanpäällä tehdyn kuuntelun perusteella arviolta puolessa ohiajaneista henkilöautoista oli

nastarenkaat. Nastarenkaiden vaikutusta päällysteiden meluominaisuuksiin päätettiin tutkia vertailemalla nastattomien sekä nastallisten henkilöautojen ohiajojen keskiäänitasoja.

Edellä mainittujen Intiankadun ja Pirkkolantien mittausten lisäksi tarkasteltavaksi otettiin Malminkartanontien mittaus (31.10.), jota ei otettu mukaan muihin tuloksiin. Jokaisesta kohteesta valittiin 15 nastallista ja 15 nastatonta henkilöautoa, joiden ohiajoille määritettiin keskiäänitaso. Näin saadut tulokset normalisoitiin samoin kuten osiossa 6.1.4. Tulokset on esitetty kuvassa 6.5, jossa vertaillaan ohiajojen keskiäänitasoja nastarenkaiden ja tavallisten renkaiden välillä. Tuloksista voidaan huomata nastarenkaiden nostavan ohiajojen aikaista keskiäänitasoa noin 5 dB päällystetyypistä riippumatta.



Kuva 6.5: Mitatut ohiajojen keskiäänitasot rengastyypeittäin 10 m etäisyydellä tien keskiviivasta normalisoituna taustamelun, lämpötilan ja keskinoisuuden mukaisesti. Tulokset laskettu 15 henkilöauton ohiajon keskiarvona.

6.2 Kohteiden laskennallinen tarkastelu

Mitatuille kohteille suoritettiin myös laskennallinen tarkastelu, jossa tutkittiin päiväaikaisia keskiäänitasoja kohteiden ympäristössä ja tästä syntyviä eroja uuden ja vanhan päällysteen välillä. Laskentamallin lähtötietoina käy-

tettiin osiossa 5.1.1 esiteltyjä maastomallin tietoja sekä mittauksista saatuja tuloksia. Laskentamallissa tien emissiotasoksi asetettiin 10 m etäisyydeltä tiestä mitattu koko mittausjakson keskiarvo, $L_{Aeq} \cdot 10\text{m}$ (Pohjoismainen tieliikennemelun laskentamalli, Nordic Prediction Method). Mittausjaksojen keskiarvot on esitetty taulukossa 6.3.

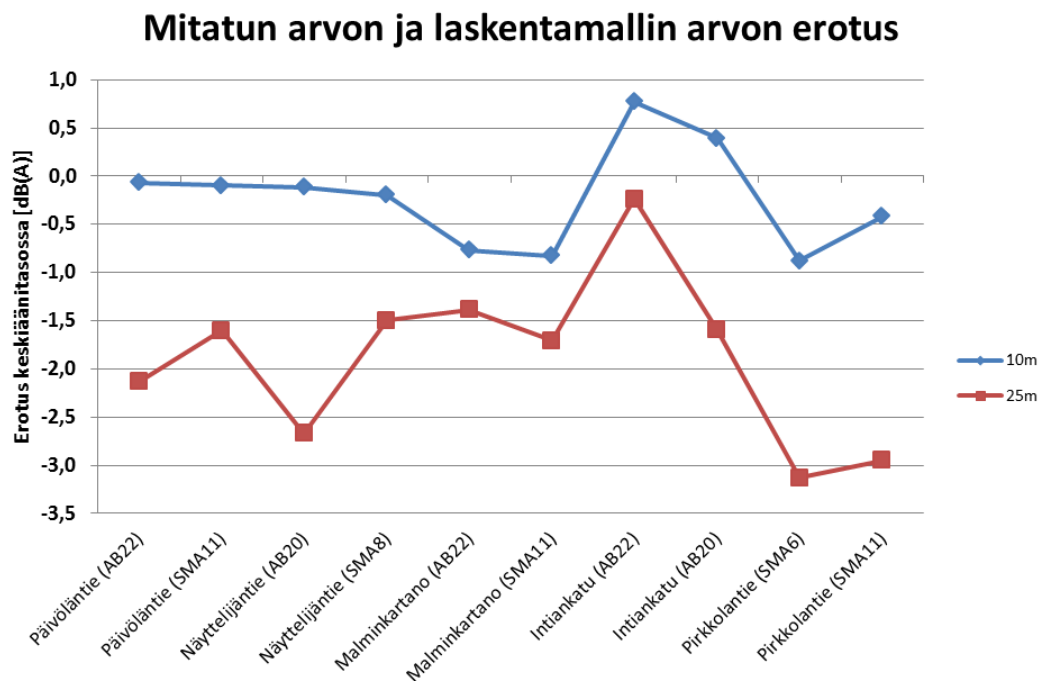
Taulukko 6.3: Mittausten aikaiset keskiäänitasot.

Mitattu katu ja päälystetyyppi	Keskiäänitaso [dB]
Päivöläntie (AB22)	65,0
Päivöläntie (SMA11)	62,4
Näyttelijäntie (AB20)	68,4
Näyttelijäntie (SMA8)	64,8
Malminkartanontie (AB22)	69,3
Malminkartanontie (SMA11)	66,0
Intiankatu (AB22)	65,5
Intiankatu (AB20)	66,4
Pirkkolantie (SMA6)	72,7
Pirkkolantie (SMA11)	67,6

Laskennoista tehdyt melukartat on esitetty liitteessä B. Laskennat tehtiin Näyttelijäntielle, Päivöläntielle ja Malminkartanontielle. Intiankadulle ja Pirkkolantielle laskennallista tarkastelua ei suoritettu, koska Pirkkolantiellä uuden ja vanhan päällysteen mittaukset suoritettiin eri pisteistä, vaikeuttaen niiden vertailua keskenään, ja Intiankadulla ero uuden ja vanhan päällysteen välillä oli niin vähäinen, ettei laskennallisessa tarkastelussa syntynyt tarpeeksi suurta eroa niiden välille.

Verratessa mitattuja arvoja laskentamallin tuloksiin, laskentamallin epätarkkuudeksi saatiin noin $\pm 2\text{ dB}$, epätarkkuuden noustessa etäisyyden kasvaessa tiestä. Laskentamallin epätarkkuutta on havainnollistettu kuvassa 6.6, jossa

on esitetty laskentamallista ja mittauksista saatujen tulosten välinen ero. Kuvan perusteella voi todeta laskentamallin antamien keskiäänitasojen olevan pienempiä kuin mitatut 10 m etäisyydellä tien keskilinjasta. Etäisyyden kasvaessa mallin epätarkkuus kasvaa, johtaen siihen, että 25 m etäisyydellä laskentamallin antamat keskiäänitasot ovat suurempia kuin mitatut. Laskennat yritettiin tehdä myös käyttämällä äänilähteen lähtötasona mitattuja liikennetietoja, mutta tällöin ero mitattuihin tuloksiin nähden kasvoi liian suureksi ja tästä menetelmästä päätettiin luopua.



Kuva 6.6: Mitattujen ja laskentamallista saatujen keskiäänitasojen erotukset.

Laskentamallin tulosten perusteella voidaan todeta liikennemelun päiväaikaisen keskiäänitason ($L_{Aeq(07-22)}$) laskevan kaikissa kohteissa siirryttäessä vanhasta AB tai SMA päällysteestä uuteen SMA päällysteeseen, saavutetun äänitason laskun vaihdellessa kohteiden maaston muotojen ja tiellä vallitsevan keskinopeuden mukaan. Uudella päällysteellä saatu päiväaikaisen keskiäänitason alenema oli kuitenkin keskimäärin noin 2 - 3 dB, laskien tasaisesti etäisyyden kasvaessa tien keskilinjasta. Merkittävin vaikutus päällysteellä onkin näin ollen tien välittömässä läheisyydessä.

Näyttelijäntiellä, jossa keskinopeus oli noin 42 km/h, saavutetaan 2 dB keskiäänitason alenema noin 50 - 100 m etäisyydellä tien keskiviivasta. Suurta

vaihtelua etäisyyksiin tuottaa Näyttelijäntien ympäristön maastonmuotojen vaihtelevuus. Keskiäänitasojen alenema on tasaisempaa Päivöläntiellä (keskinopeus noin 39 km/h), jossa 2 dB keskiäänitason alenema saavutetaan noin 50 - 60 m etäisyydellä tien keskilinjasta.

Suurin keskiäänitason alenema saavutetaan Malminkartanonttiellä, jossa 3 dB keskiäänitason alenema ulottuu noin 70 m päähän ja 2 dB alenema yli 110 m päähän tien keskilinjasta. Suurempi vaimeneminen johtuu pääosin korkeamman keskinopeuden aiheuttamasta korkeammasta lähtötasosta, jolloin suhteellinen melutasojen vaimeneminen on suurempaa.

6.3 Virhetarkastelu

Epätarkkuuksia mittauksiin aiheuttivat erityisesti vaihtelevat sääolosuhteet, jotka muuttuivat huomattavasti mittausten aikataulun pitkittyessä syksylle. Erityisesti Pirkkolantien tuloksia pitää tulkita varauksella, mittausten aikaisen lämpötilan oltua alle 5 °C.

Suurin osa mittauksista tehtiin olosuhteissa, joissa tuulella ei ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Näyttelijäntien vanhaa päällystettä mitattaessa voimakas tuuli on kuitenkin voinut vaikuttaa taustamelun tasoon sitä kasvattavasti.

Maaston muodot mitattavien kohteiden ympäristössä johtivat siihen, että mittauspaikalle asetetut vaatimukset (esitetty osiossa 5.1) eivät täyttyneet täysin yhdessäkään kohteessa. Maaston muodoista johtuen 25 m etäisyydellä oleva mittari sijaitsi 1 - 3 m korkeammalla kuin 10 m etäisyydellä oleva mittari Näyttelijäntien, Intiankadun ja Malminkartanonttien, sekä Pirkkolantien uuden päällysteen mittauksissa. Lisäksi Malminkartanonttiellä, Intiankadulla, Näyttelijäntiellä sekä Pirkkolantiellä tien ja 25 m etäisyydellä olleen mittarin välisellä alueella sijaitsi harvakseltaan puita. Korkeuserolla ja puilla ei kuitenkaan oleteta olevan merkittävää vaikutusta saatuihin tuloksiin.

Kohteiden päällystysaikataulussa tapahtuneiden muutosten johdosta Pirkkolantien uuden ja vanhan päällysteen mittaukset suoritettiin eri kohdista, vaikeuttaen entuudestaan kohteesta saatujen tulosten vertailua. Pirkkolantien ohiajojen keskiäänitasojen vertailu onkin enintään suuntaa-antava. Laskennallista tarkastelua Pirkkolantielle ei tästä syystä voitu tehdä.

Luku 7

Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia rengasmelua kesällä 2013 Helsingin aluella päällystettyjen tieosuuksien varrella sekä arvioida käytettyjen päällysteiden meluominaisuuksia. Mittauksia suoritettiin viiden eri tienosuuden varrella, joista neljä päällystettiin kivimastiksiasiäsfaltilla ja yksi asfalttibetonilla. Kaikista kohteista mitattiin ohiajojen keskiäänitasot sekä vanhalla että uudella päällysteellä.

Saatujen tulosten perusteella voidaan todeta tuoreen SMA-päällysteen laskevan henkilöauton ohiajon aikaista keskiäänitasoa 3 - 5 dB verrattuna vastaavaan ohiajoon vanhalla päällysteellä. Eroja päällysteen eri raekokojen välillä ei havaittu, joskin työssä tarkasteltu päällysteiden joukko oli liian pieni, jotta raekoon vaikutuksesta keskiäänitasoon voitaisiin tehdä johtopäätöksiä.

Suurimmat rengasmelun voimakkuuteen vaikuttavat tekijät ovat nopeus ja renkaiden laatu. Suurin hyöty kivimastiksiasiäsfaltin käytöstä saavutetaan tieosuuksilla, joissa keskinopeus on vähintään 50 km/h, keskiäänitason aleneman ollessa vähäisempää tieosuuksilla, joissa keskinopeus oli 40 km/h. Käytettäessä nastarenkaita erot eri teiden ja nopeuksien välillä kuitenkin katosivat, nastarenkaiden nostaessa ohiajon aikaista keskiäänitasoa noin 5 dB:llä.

Laskennallisessa tarkastelussa todettiin päiväaikaisten keskiäänitasojen ($L_{Aeq(07-22)}$) laskevan tarkasteltavan tiesuuden ympäristössä. Näyttelijän- ja Päivöläntiellä, joissa keskinopeus oli noin 40 km/h, tarkastellun tieosuuden aiheuttamat keskiäänitasot laskivat 2 dB noin 50 - 100 m etäisyydellä tien keskilinjasta, riippuen ympäröivän maaston muodoista. Päivöläntiellä 2 dB vyöhykkeen leveys vaihtelee vähemmän, sijoittuen noin 50 - 70 m etäisyydelle tien keskilinjasta. Malminkartanonttiellä keskiäänitaso alenema on muita kohteita hieman suurempi, ollen jopa 3 dB. Tämä johtunee tieosuuden korkeammasta keskinopeudesta, jonka vaikutus syntyvään rengasmelun ta-

soon on huomattava. Päivöläntiellä, jossa asuinrakennukset ja niiden piha-alueet sijaitsevat lähempänä tietä, vaikutus alueen asukkaille on suurempi kuin Näyttelijäntiellä, jossa tien varrella olevat kerrostalot sijaitsevat keskimäärin kauempana. Saavutettava hyöty riippuu myös tarkasteltavan kohteen (asuinrakennuksen piha-alueen) sijainnista suhteessa päällystettyyn tieosuuteen sekä kohteen taustamelutasosta. Hyöty on suurin kohteissa, joissa piha-alueet sijaitsevat tien välittömässä läheisyydessä ja joissa taustamelutasot ovat selvästi pienemmät kuin ohiajojen aiheuttama melutaso.

Kirjallisuutta

- [1] Larri Liikonen ja Paula Leppänen. Altistuminen ympäristömelulle suomessa, tilannekatsaus 2005. Technical report, Ympäristöministeriö, 2005.
- [2] Kristina Levak, Marko Horvat, and Hrvoje Dominitrović. Effects of noise on humans. In *50th International Symposium ELMAR-2008*. Faculty of Electrical Engineering and Computing, 2008.
- [3] HKR. Helsingin kaupungin meluntorjunnan toimintasuunnitelman tarkistus 2013, January 2013.
- [4] Thomas Rossing, Richard Moore, and Paul Wheeler. *The Science of Sound*. Addison-Wesley, third edition, 2002.
- [5] Tapio Lahti. *Ympäristömelun arviointi ja torjunta*. Ympäristöopas, 101, 1238-8602. Suomen ympäristökeskus, 2003.
- [6] Matti Karjalainen. *Kommunikaatioakustiikka*. Otamedia Oy, 2000.
- [7] Ulf Sandberg and Ejsmont Jerzy. *Tyre/Road Noise Reference Book*. Kisa : Informex, 2002.
- [8] Marja Heinonen-Guzejev ja Heikki Vuorinen. Liikennemelun terveysvaikutuksien tutkiminen. Technical report, Ympäristöministeriö, 2009.
- [9] Stephen Stansfeld and Mark Matheson. Noise pollution: non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin*, 68:243–257, 2003.
- [10] Tapio Lahti. *Akustinen mittaustekniikka*. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo, 1997.
- [11] Nina Raitanen. *Measuring of noise and wearing of quiet surfaces*. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2005.

- [12] Greg Watts and Phil Abbott. Tyre and road surface parameters affecting tyre/road noise. Technical report, TRL Ltd, Wokingham, Berkshire, UK, 2005.
- [13] Hayden RE. Roadside noise from the interaction of a rolling tire with the road surface. In *Proceedings of the Purdue Noise control Conference*, pages 59–64, 1971.
- [14] Gagen MJ. Novel acoustic sources from squeezed cavities in car tires. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106:794–801, 1999.
- [15] Söderqvist S. Nilsson N-A and Bennerhult O. Air resonant radiation - a possible mechanism for high frequency noise from cross-bar tires. Technical report, IFM Akustikbyran, 1979. Research report 6.084.02.
- [16] B. S. Kim, G. J. Kim, and T. K. Lee. The identification of sound generating mechanisms of tyres. *Applied Acoustics*, 68:114–133, 2007.
- [17] A. Kujipers and G. van Blokland. Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation. In *The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, The Hague, The Netherlands, 2001.
- [18] Graf R. A. G., Kuo C.-Y., Dowling A. P., and W. R. Graham. On the horn effect of a tyre/road interface, part i: Experiment and computation. *Journal of Sound and Vibration*, 256(3):417–431, 2002.
- [19] ISO 13473-1:1997. Characterization of pavement texture by use of surface profiles - part i: Determination of mean profile depth. Technical report, International Organisation for Standardisation (ISO), Geneva, Switzerland, 1997.
- [20] J. Chavet, A. Dahbi, G. Desconet, M. Dhir, S. Huschek, and J.P. Leyder. Optimization of surface characteristics. In *Technical Committee Report on Surface Characteristics XVIIth World Road Congress*, Brussels, Belgium, 1987.
- [21] P. M. Nelson S. Phillips, S. Kollamthodi and P. G. Abbott. Study of medium and high speed tyre/road noise. Technical report, TRL Ltd, 2003.
- [22] H. Bendsten, Q. Lu, and E. Kohler. Temperature influence on road traffic noise: Californian obsi measurement study. Technical report, The Danish road institute, 2010. Reprint report UCPRC-RP-2010-02.

- [23] SFS. Tiepäälysteiden liikennemeluvaikutuksen mittaaminen. osa 1: Tilastollinen ohiajomenetelmä. Technical report, Suomen Standardoimisliitto SFS, 2002. Standardi SFS-EN ISO 11819-1.
- [24] R. O. Rasmussen, R. J. Bernhard, U. Sandberg, and E. P. Mun. The little book of quieter pavements. Technical report, Prepared by the Transtec Group for Federal Highway Administration, U. S. Department of transportation, 2008.
- [25] M. Alauddin Ahammed and Susan L. Tighe. Quiet pavements: A sustainable and environmental friendly choice. In *2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, Toronto, Ontario, 2008.
- [26] G. Greer. Stone mastic asphalt - a review of its noise reducing and early life skid resistance properties. In *Acoustics 2006*, Christchurch, New Zealand, 2006.
- [27] Punnamee Sachakamol. *Optimal traffic noise reduction with asphalt rubber concrete (ARC) and establishment of a quantitative traffic noise prediction model*. PhD thesis, University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada, 2011.
- [28] M. Muirhead, L. Morris, and R. E. Stait. The performance of quieter surfaces over time. Technical report, Transport Research Laboratory, March 2010. PPR485.

Liite A. Kohdekohtaiset tulokset

Päivöläntie (AB22), vanha päällyste

Paikka: noin 20 m Hiidenkiventien risteyksestä etelään

Aika: 3.6.2013

klo 14:20 – 16:50 (2h 30min)

Lämpö: +26,6 °C

Tuuli: 0,6 m/s, Idästä

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 39 km/h

Oikealle:

Kevyet: 526

Raskaat: 26

Vasemmalle:

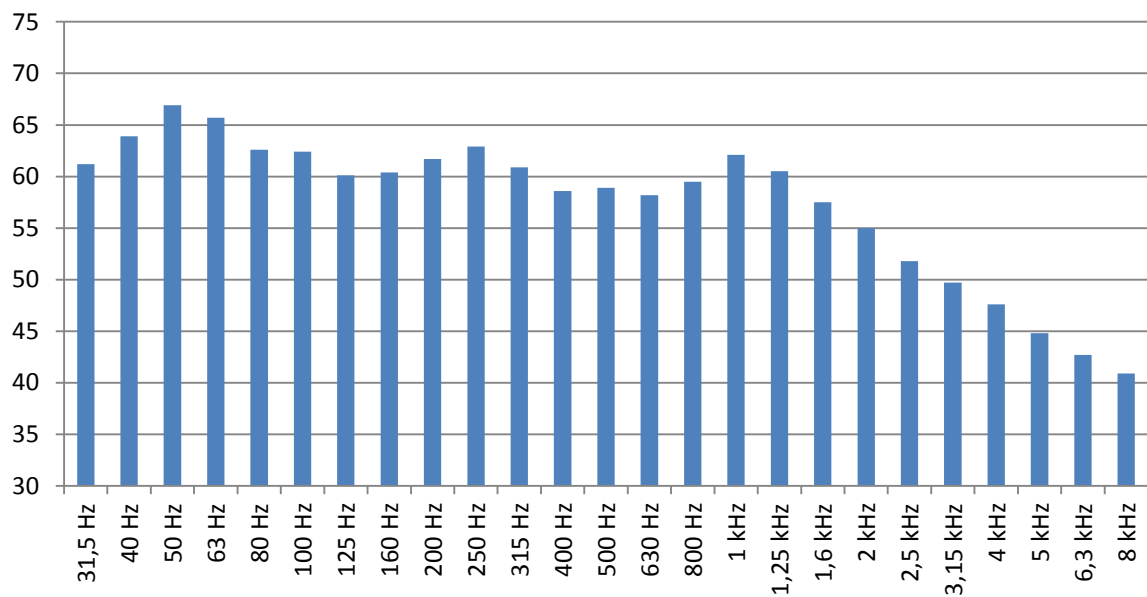
Kevyet: 420

Raskaat: 27

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	69,7 dB	57,9 dB
Ohiajo, normalisoitu:	70,3 dB	57,7 dB
Koko mittausjakso:	65,0 dB	55,7 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Päivöläntie (SMA11), uusi päällyste

Paikka: noin 30 m Hiidenkiventien risteyksestä etelään

Aika: 2.10.2013

klo 11:50 – 15:30 (3h 20min)

Lämpö: +8,8 °C

Tuuli: 0,4 m/s, Lounaasta

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 38 km/h

Oikealle:

Kevyet: 529

Raskaat: 25

Vasemmalle:

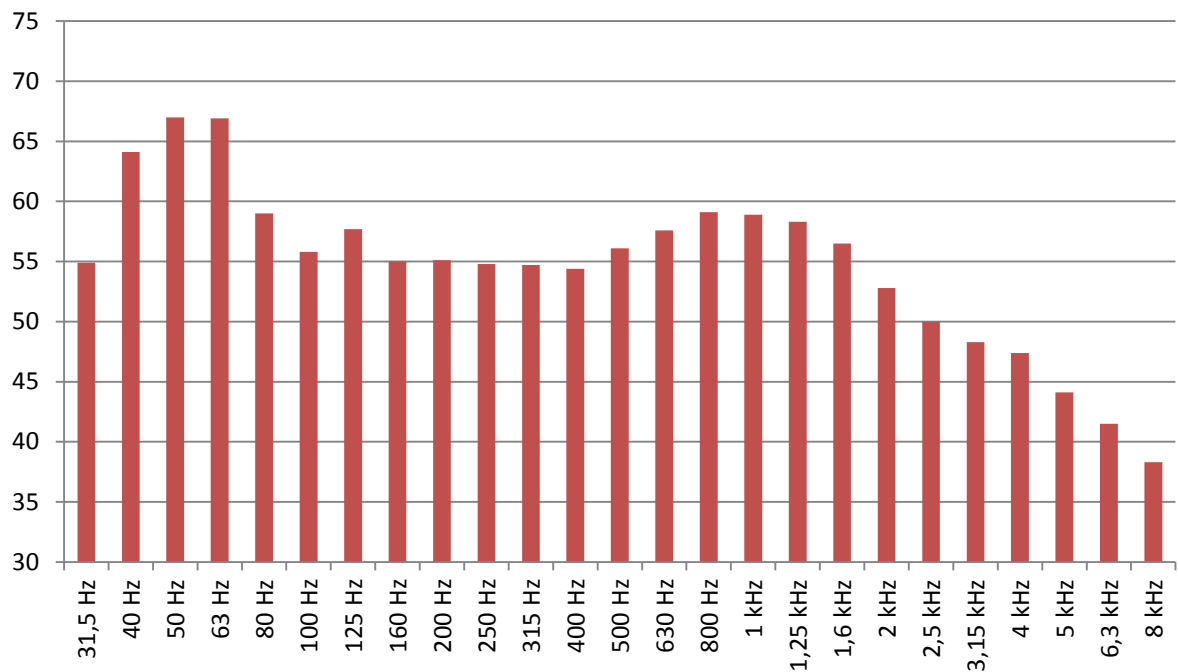
Kevyet: 475

Raskaat: 41

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	66,3 dB	57,3 dB
Ohiajo, normalisoitu:	66,4 dB	56,5 dB
Koko mittausjakso:	62,4 dB	55,1 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Näyttelijäntie (AB20), vanha päällyste

Paikka: noin 250 m Kaupintien risteyksestä etelään

Aika: 28.5.2013

klo 9:40 – 12:50 (3h 10min)

Lämpö: +24,3 °C

Tuuli: 3,3 m/s, Luoteesta

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 42 km/h

Oikealle:

Kevyet: 913

Raskaat: 74

Vasemmalle:

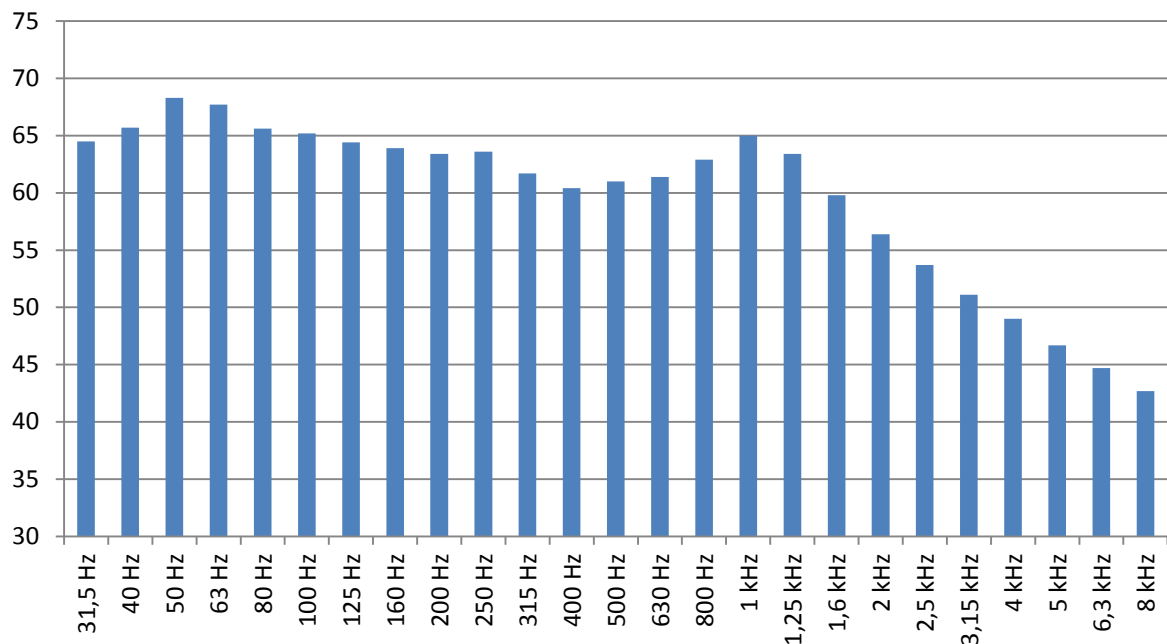
Kevyet: 929

Raskaat: 64

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	71,0 dB	62,1 dB
Ohiajo, normalisoitu:	70,3 dB	61,1 dB
Koko mittausjakso:	68,3 dB	60,1 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Näyttelijäntie (SMA8), uusi päällyste

Paikka: noin 250 m Kaupintien risteyksestä etelään

Aika: 3.9.2013

klo 12:20 – 15:15 (2h 55min)

Lämpö: +17,1 °C

Tuuli: 0,6 m/s, Lounaasta

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 41 km/h

Oikealle:

Kevyet: 940

Raskaat: 65

Vasemmalle:

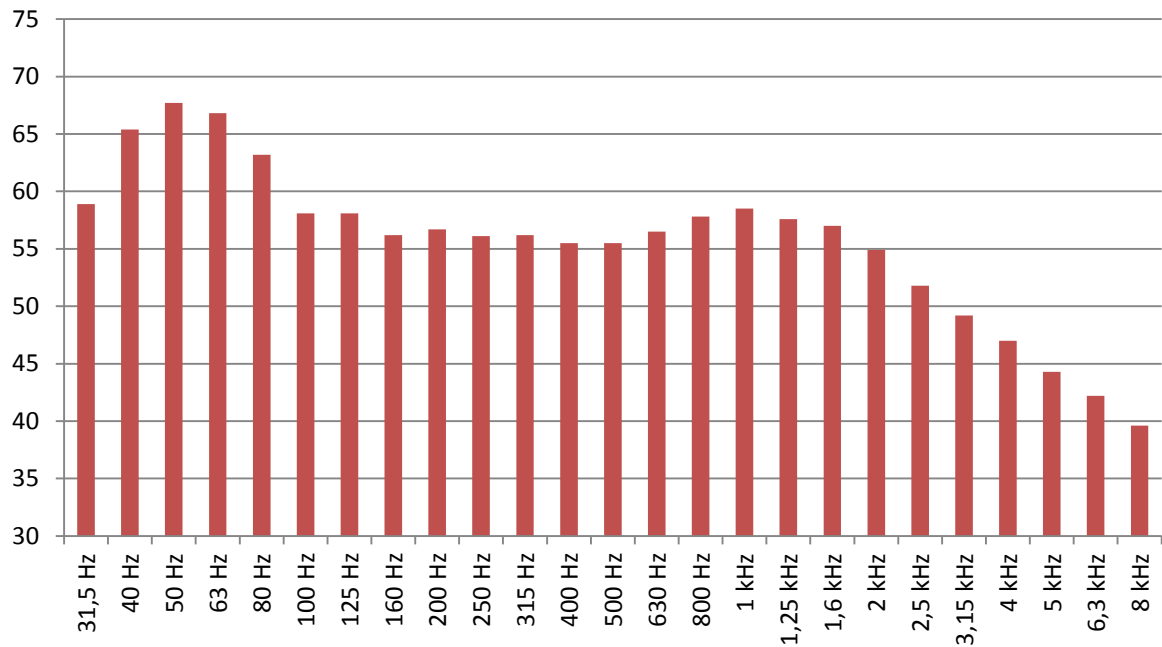
Kevyet: 793

Raskaat: 55

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	66,2 dB	58,8 dB
Ohiajo, normalisoitu:	65,4 dB	57,2 dB
Koko mittausjakso:	60,1 dB	58,1 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Malminkartanontie (AB22), vanha päällyste

Paikka: noin 30 m Kartanonmetsäntien risteyksestä etelään

Aika: 9.7.2013

klo 13:30 – 16:20 (2h 50min)

Lämpö: +24 °C

Tuuli: 0,5 m/s, Lounaasta

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 50 km/h

Oikealle:

Kevyet: 677

Raskaat: 52

Vasemmalle:

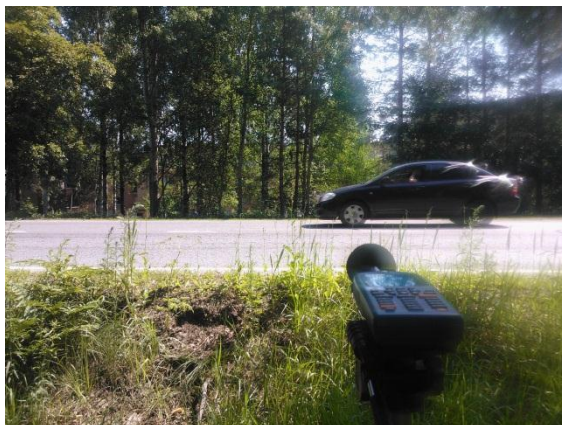
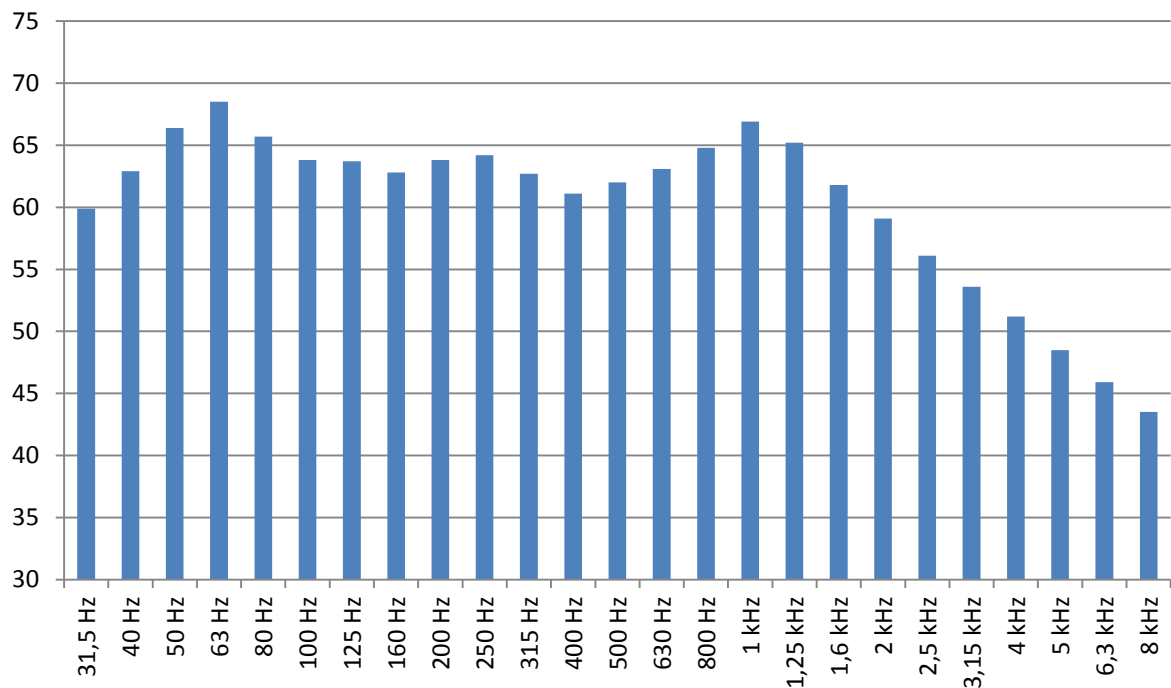
Kevyet: 878

Raskaat: 44

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	72,8 dB	66,1 dB
Ohiajo, normalisoitu:	69,5 dB	66,0 dB
Koko mittausjakso:	69,3 dB	63,9 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Malminkartanontie (SMA11), uusi päällyste

Paikka: noin 30 m Kartanonmetsäntien risteyksestä itään

Aika: 12.9.2013

klo 10:45 - 13:50 (3h 5min)

Lämpö: +19,3 °C

Tuuli: 0,7 m/s, Pohjoisesta

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 45 km/h

Oikealle:

Kevyet: 987

Raskaat: 32

Vasemmalle:

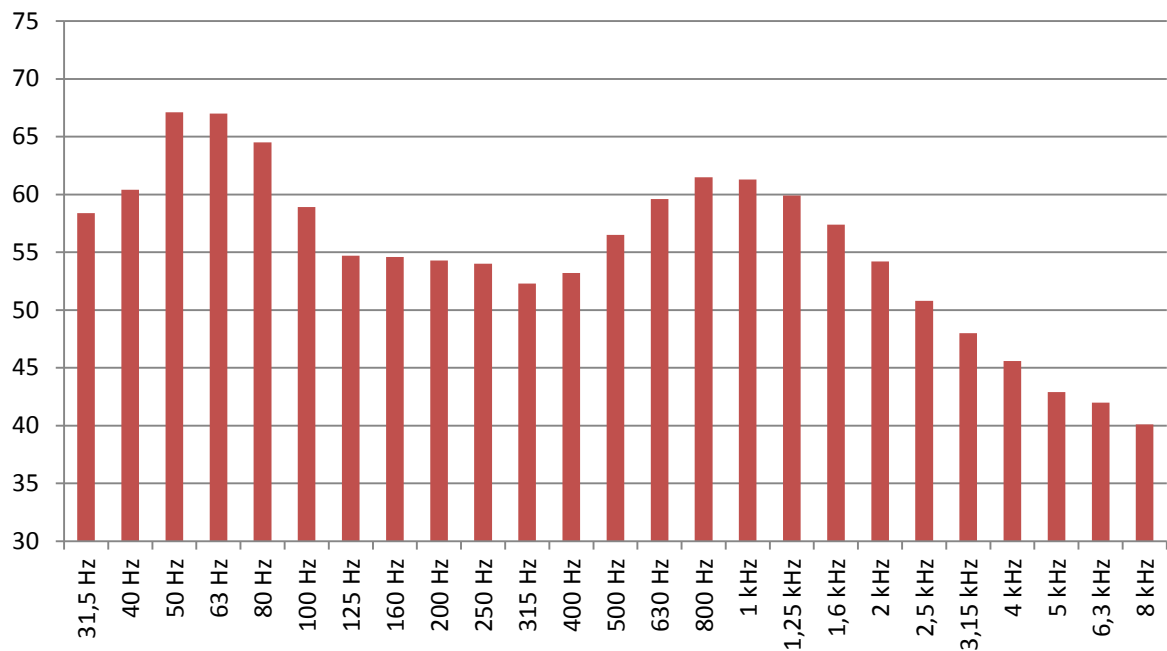
Kevyet: 1018

Raskaat: 35

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	67,8 dB	56,5 dB
Ohiajo, normalisoitu:	65,9 dB	55,6 dB
Koko mittausjakso:	65,9 dB	59,5 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Intiankatu (AB22), vanha päällyste

Paikka: noin 200 m Koskelantien risteyksestä etelään

Aika: 26.6.2013

klo 9:30 – 12:15 (2h 45min)

Lämpö: +25,1 °C

Tuuli: 0,5 m/s, Pohjoisesta

Maaperä: Kuiva

Liikenne:

Nopeus: 41 km/h

Oikealle:

Kevyet: 330

Raskaat: 48

Vasemmalle:

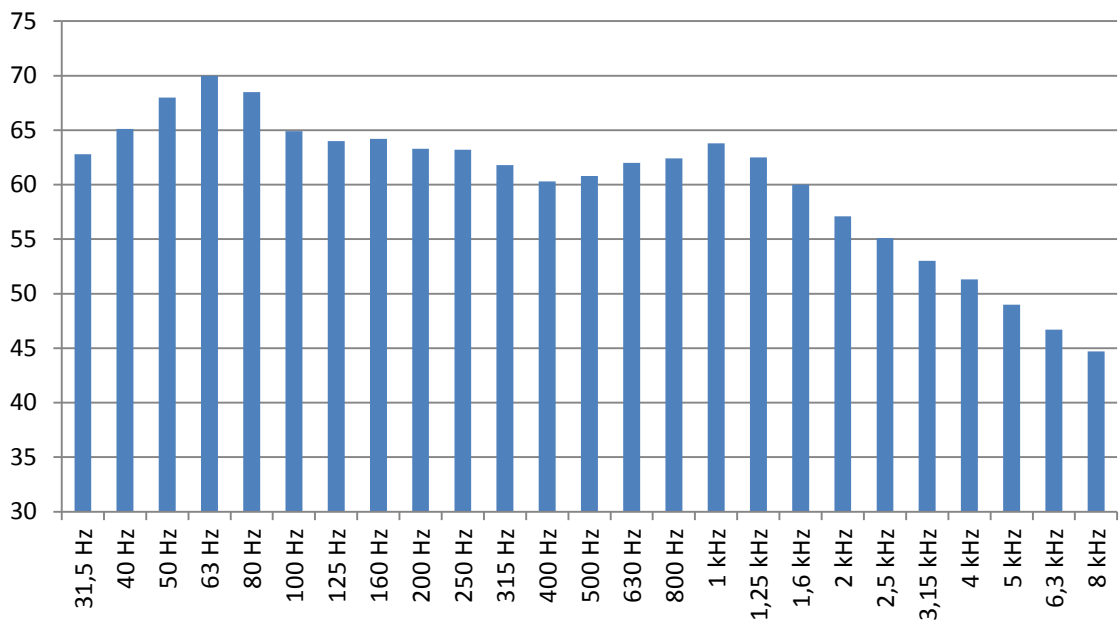
Kevyet: 537

Raskaat: 73

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	70,8 dB	60,9 dB
Ohiajo, normalisoitu:	70,7 dB	60,8 dB
Koko mittausjakso:	65,6 dB	59,8 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Intiankatu (AB20), uusi päällyste

Paikka: noin 200 m Koskelantien risteyksestä etelään

Aika: 11.11.2013

klo 10:45 – 13:30 (2h 45min)

Lämpö: +4,2 °C

Tuuli: 0,3 m/s, Pohjoisesta

Maaperä: Kosteaa

Liikenne:

Nopeus: 42 km/h

Oikealle:

Kevyet: 318

Raskaat: 53

Vasemmalle:

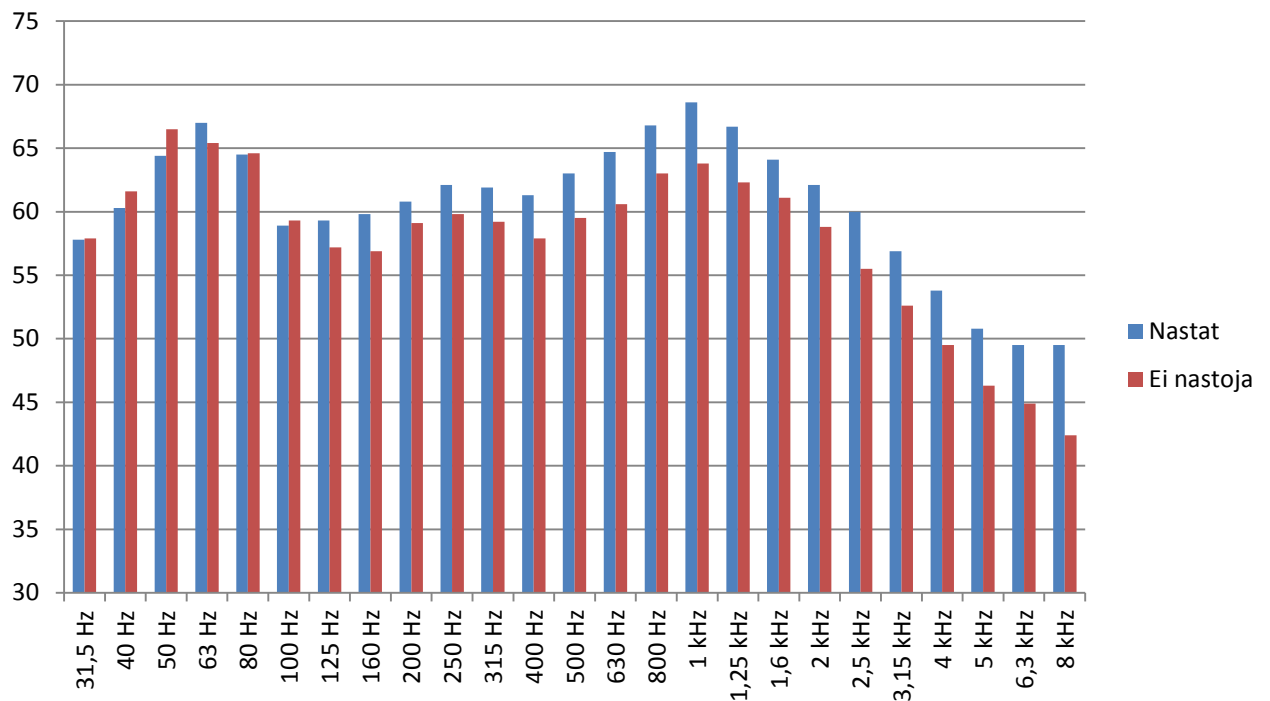
Kevyet: 401

Raskaat: 66

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	70,8 dB	60,9 dB
Ohiajo, normalisoitu:	69,0 dB	60,2 dB
Koko mittausjakso:	65,4 dB	57,0 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Pirkkolantie (SMA6), vanha päällyste

Paikka: noin 350 m Metsäpurontien risteyksestä lounaaseen

Aika: 11.11.2013

klo 14:15 – 16:20 (2h 5min)

Lämpö: +2,4 °C

Tuuli: 0,4 m/s, Idästä

Maaperä: Kosteaa

Liikenne:

Nopeus: 53 km/h

Oikealle:

Kevyet: 651

Raskaat: 80

Vasemmalle:

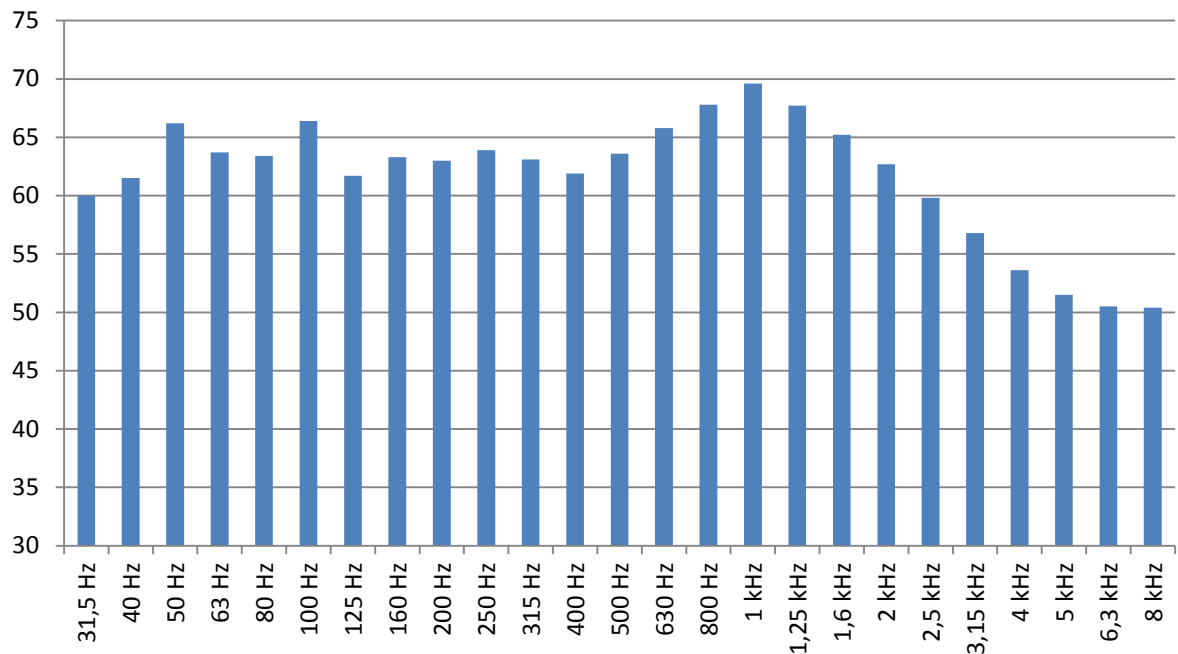
Kevyet: 379

Raskaat: 64

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	75,5 dB	63,3 dB
Ohiajo, normalisoitu:	70,2 dB	61,1 dB
Koko mittausjakso:	71,5 dB	60,0 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)



Pirkkolantie (SMA11), uusi päällyste

Paikka: noin 130 m Pakilantien risteyksestä länteen

Aika: 18.11.2013

klo 11:00 – 13:55 (2h 55min)

Lämpö: +5,7 °C

Tuuli: 1,9 m/s, Pohjoisesta

Maaperä: Kosteaa

Liikenne:

Nopeus: 41 km/h

Oikealle:

Kevyet: 543

Raskaat: 51

Vasemmalle:

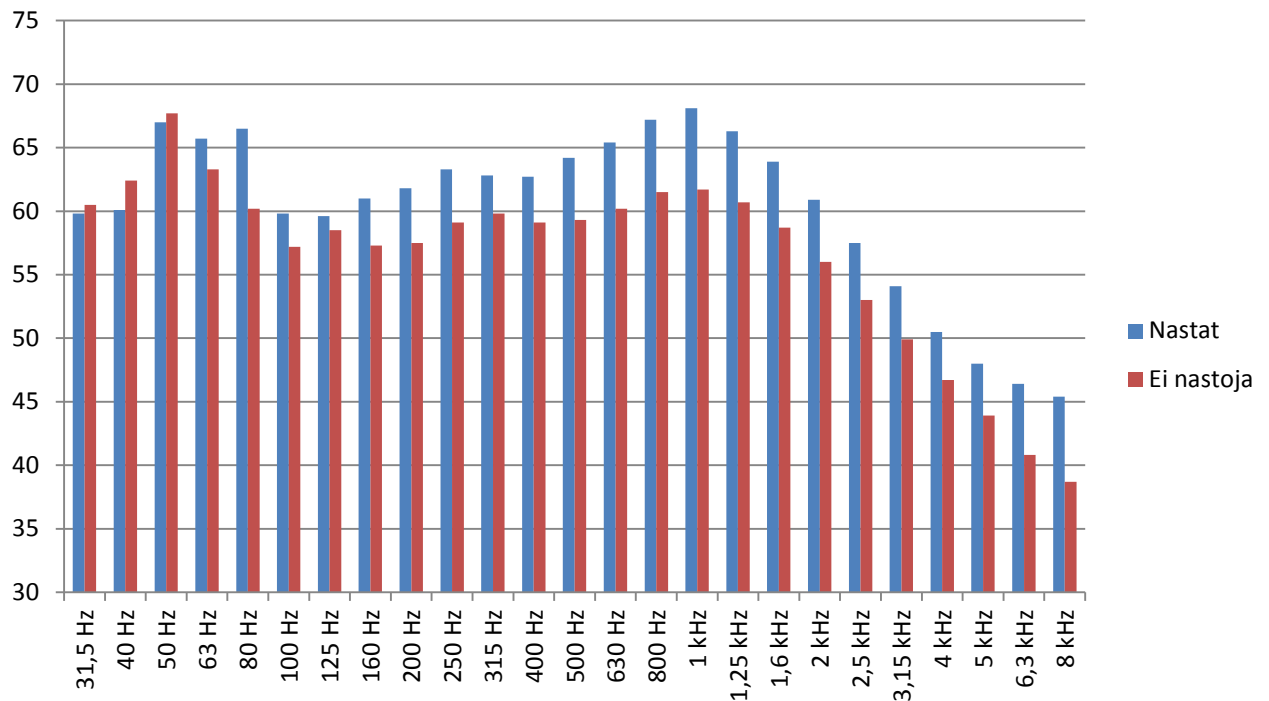
Kevyet: 477

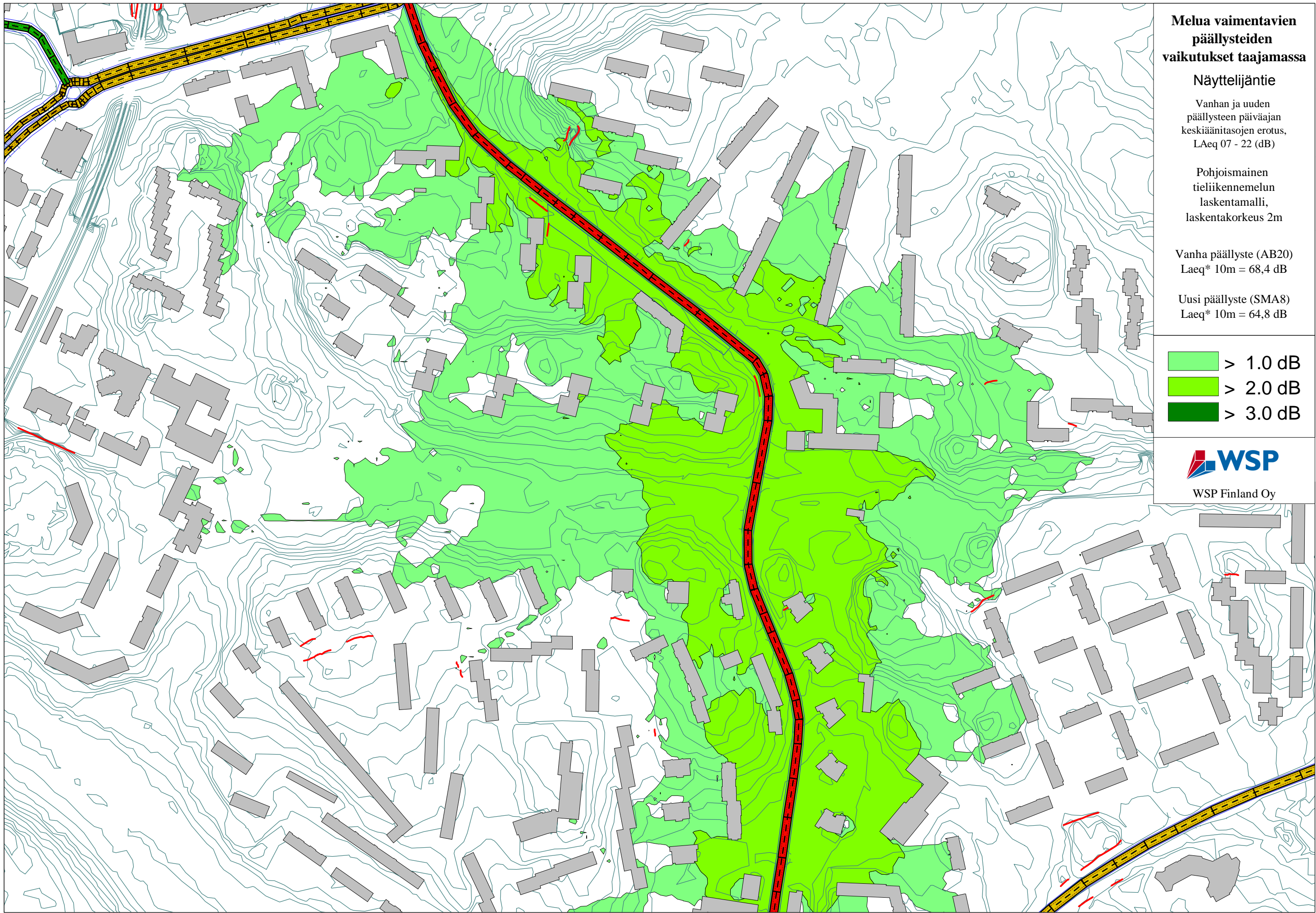
Raskaat: 45

Keskiäänitaso:

	10 m	25 m
Ohiajo:	68,8 dB	61,7 dB
Ohiajo, normalisoitu:	67,4 dB	60,1 dB
Koko mittausjakso:	66,5 dB	59,8 dB

Taajuuspainottamaton spektri terssikaistoittain (10m)





**Melua vaimentavien
päälysteiden
vaikutukset taajamassa**

Näyttelijäntie

Vanhan ja uuden
päälysteen päiväajan
keskiäänitasojen erotus,
LAeq 07 - 22 (dB)

Pohjoismainen
teliikennemelun
laskentamalli,
laskentakorkeus 2m

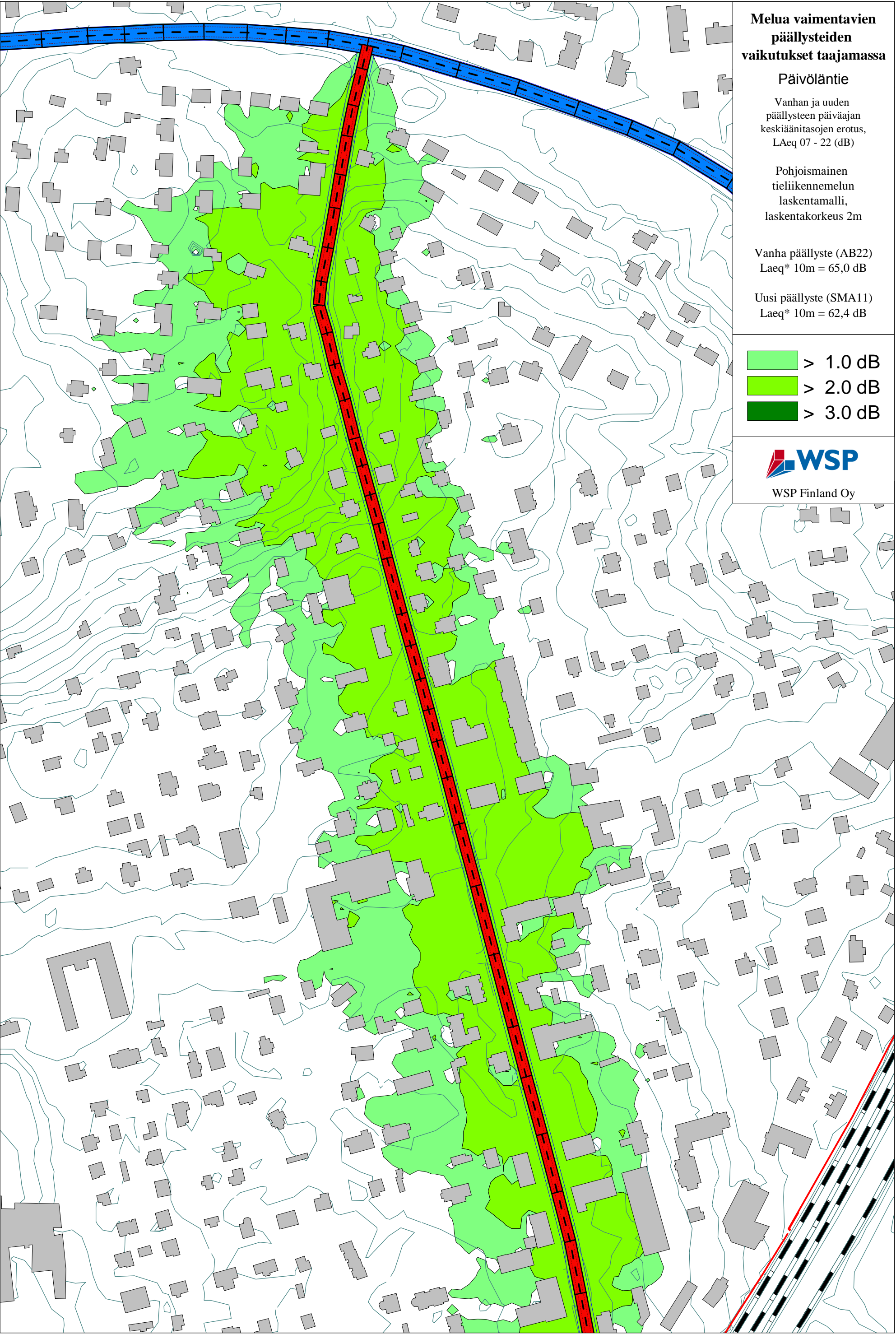
Vanha päälyste (AB20)
Laeq* 10m = 68,4 dB

Uusi päälyste (SMA8)
Laeq* 10m = 64,8 dB

- > 1.0 dB
- > 2.0 dB
- > 3.0 dB



WSP Finland Oy



**Melua vaimentavien
päälysteiden
vaikutukset taajamassa**

Päivöläntie

Vanhan ja uuden
päälysteen päiväajan
keskiäänitasojen erotus,
L_{Aeq} 07 - 22 (dB)

Pohjoismainen
teliikennemelun
laskentamalli,
laskentakorkeus 2m

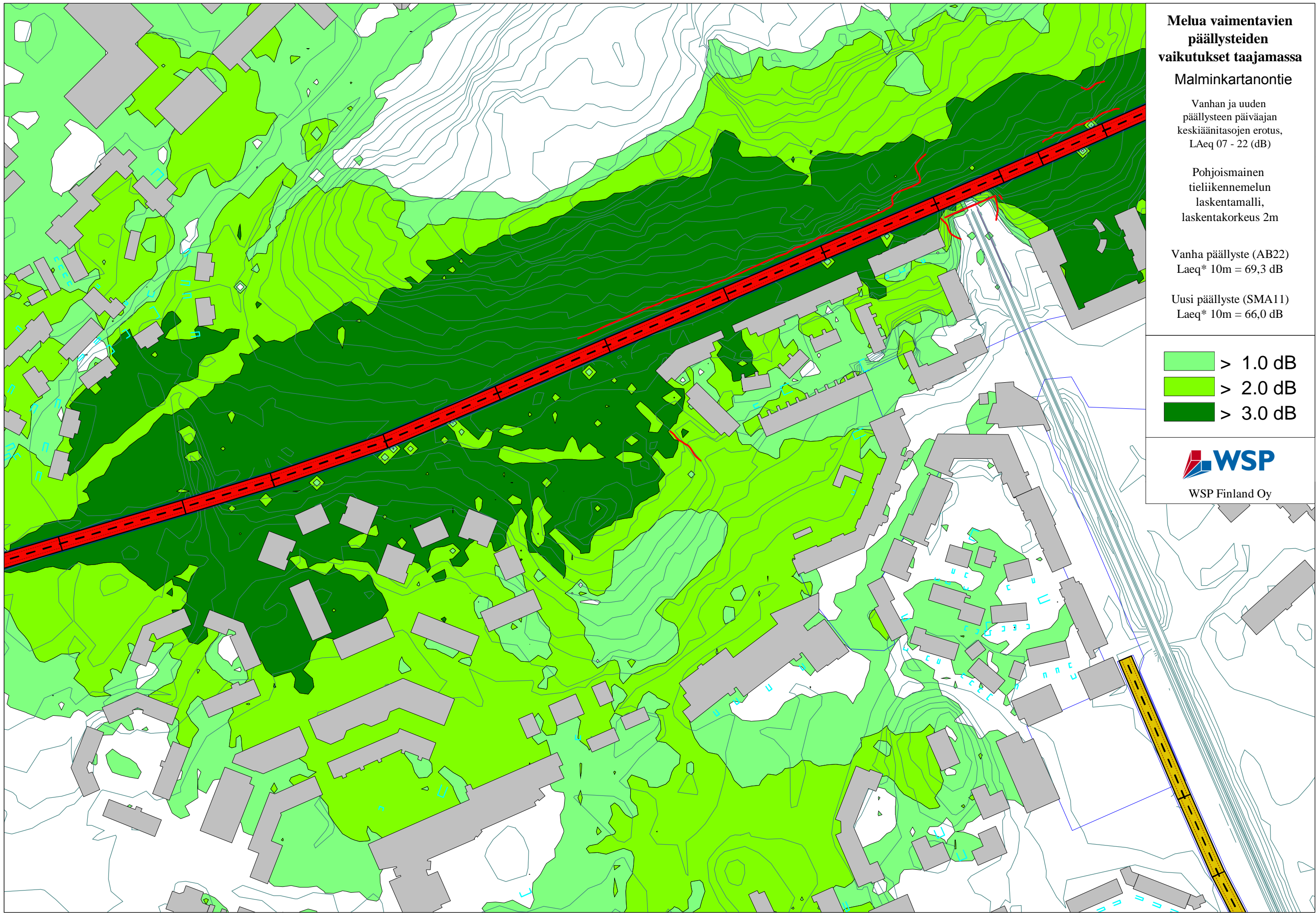
Vanha päällyste (AB22)
L_{Aeq}* 10m = 65,0 dB

Uusi päällyste (SMA11)
L_{Aeq}* 10m = 62,4 dB

- > 1.0 dB
- > 2.0 dB
- > 3.0 dB



WSP Finland Oy



**Melua vaimentavien
päällysteiden
vaikutukset taajamassa
Malminkartanontie**

Vanhan ja uuden
päällysteen päiväajan
keskiäänitasojen erotus,
LAeq 07 - 22 (dB)

Pohjoismainen
tieliikennemelun
laskentamalli,
laskentakorkeus 2m

Vanha päällyste (AB22)
LAeq* 10m = 69,3 dB

Uusi päällyste (SMA11)
LAeq* 10m = 66,0 dB

- > 1.0 dB
- > 2.0 dB
- > 3.0 dB



WSP Finland Oy